



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Joonas Reunamo

**Katseenseuranta virtuaaliympäristöön:
Prototyypin kehitys ja arviointi**

Diplomityö

Tarkastajat: professori
Kaisa Väänänen-Vainio-Mattila ja
professori Asko Ellman
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunnan
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
5.10.2011

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Tietotekniikan koulutusohjelma

JOONAS REUNAMO: Katseenseuranta virtuaaliympäristöön: Prototyypin kehitys ja arviointi

Diplomityö, 74 sivua

Tammikuu 2012

Pääaine: Käytettävyys

Tarkastajat: professori Kaisa Väänänen-Vainio-Mattila ja professori Asko Ellman

Avainsanat: Katseenseuranta, virtuaaliympäristö, käyttäjätestaus

Tämän diplomityön tarkoituksena oli kehittää prototyyppi virtuaaliympäristössä käytettävästä katseenseurantajärjestelmästä Tampereen teknillisen yliopiston Konstruktiotekniikan laitoksen CAVE-virtuaaliympäristöön ja testata sen toimivuus. Vastaavanlaisia ratkaisuja on toteutettu aiemmin, mutta ne eivät ole helposti saatavilla saati sovitettavissa laboratorion laitteisto- ja ohjelmistoympäristöön ja kaupalliset järjestelmät ovat kalliita. Ehdotus järjestelmän kehittämisestä tuli Sandvik Mining and Construction Oy:lta. Valmiin prototyypin oli tarkoitus olla esiteltävissä yritysvieraille.

Laitteistoratkaisuna oli videokameran ja valaistuksen infrapunaledien kiinnittäminen virtuaaliympäristössä käytettäviin 3D-laseihin ja videon kaappaaminen USB-videokaapparilla. Ohjelmisto toteutettiin käyttäen apuna työpöytäkäyttöön tarkoitettua katseenseurantaohjelmaa nimeltä Gaze Tracker. Toteutettu ohjelma laski silmän paikan ja katseen orientaation virtuaaliympäristössä pään paikan ja orientaation sekä Gaze Trackerin tarjoaman 2D-tason pikselikoordinaattien avulla.

Järjestelmää testattiin kehitystyön aikana manuaalisesti ja ohjelmallisesti. Järjestelmän integraatiotestaus toteutettiin CAVE-virtuaaliympäristön henkilökunnan avustuksella. Lopuksi suoritettiin käyttäjätestauksen pilotti ja varsinainen käyttäjätestaus yhteensä kuudella käyttäjällä järjestelmän toimivuuden osoittamiseksi ja suurimpien jatkokehitystarpeiden tunnistamiseksi.

Tutkimuksen tuloksena järjestelmä todettiin toimivaksi. Katseenseurannan tarkkuus oli esittelytarkoitukseen riittävä ja latenssi hyvä. Järjestelmän vaste oli lähes reaaliaikainen. Myös järjestelmän merkittävimmät ongelmat tunnistettiin, joista tärkein oli ohjelmiston hankala käytettävyys järjestelmää käyttävän henkilökunnan kannalta. Ohjelmiston käyttö vaati liikaa manuaalista työtä. Laitteiston osalta kävi ilmi, että kameran asemointi ja infrapunaledien sijoittelu eivät olleet parhaat mahdolliset.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Information Technology

JOONAS REUNAMO : Eye Tracking for Virtual Environment: Development and Evaluation of a Prototype

Master of Science Thesis, 74 pages

January 2012

Major: Usability

Examiners: Professor Kaisa Väänänen-Vainio-Mattila and professor Asko Ellman

Keywords: Eye tracking, virtual environment, user testing

The goal of this thesis was to build and test a prototype of gaze tracking system for the CAVE virtual environment of Department of Mechanics and Design of Tampere University of Technology. Similar systems have been developed but they are neither easily available nor easy to integrate to the current hardware and software environment and commercial systems are expensive. Suggestion to develop the system came from Sandvik Mining and Construction Oy. Developed prototype was supposed to be functional for demonstrations for industry representatives.

Hardware was built by attaching a camera for eye tracking and infrared LEDs to the frame of 3D-glasses needed to view virtual environment and managing video capture with USB video capture device. Software was developed to work together with Gaze Tracker, a desktop eye tracking software. Software calculated eye position and gaze orientation in virtual environment based on head position and orientation and 2D plane pixel coordinates from Gaze Tracker.

System was tested during development manually and with programs. Integration testing was done with help from the staff of the CAVE environment. Finally pilot of user testing and actual user testing was conducted with total six test users to verify system functionality and identify biggest needs for further development.

System was found to be functional. Accuracy of eye tracking was satisfactory for demonstrative purposes and latency was good. System responded almost in real time. Also biggest problems of the system were discovered most important being bad usability of the software for the staff of the CAVE environment. Software required too much manual labour. Concerning hardware positioning of the camera and infrared LEDs were found to be not the best.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston Konstruktitekniikan laitokselle osittain TTY-säätiön stipendillä. Työssä toteutettiin ja testattiin ensimmäinen prototyyppi virtuaaliympäristön katseenseurantajärjestelmästä. Yhteistyössä mukana oli Savant Simulators Oy. Kiitän Savant Simulatorsin Joontan Kuosaa ohjelmoinnin kiemuroissa luotsaamisesta ja työn tarkastajia kirjallisen työn kypsyttämisestä. Lopuksi kiitän rakasta vaimoani kärsivällisyydestä tämän kirjoitustyön aiheuttamien pikku kiukuttelujen ja kotitöistä lipeämisien kanssa.

Saavuttakoot kaikki olennot onnellisuuden ja onnellisuuden syyn.

Varsovassa 19.12.2011

Joonas Reunamo

SISÄLLYS

1. Johdanto	1
2. Lähtökohdat	4
2.1 Virtuaaliympäristöt työkaluna	4
2.2 Virtuaaliympäristön visualisointi	8
2.3 Katseenseuranta tutkimuksen tukena	11
2.4 Katseenseuranta CAVE-virtuaaliympäristössä	17
2.5 Katseenseurantajärjestelmän testaus	20
3. Järjestelmän käyttöympäristö ja yleiskuvaus	22
4. Laitteisto	25
4.1 Tavoitteet	25
4.2 Kameran valinta	25
4.3 Kameran asennus	28
4.4 Videonkaappaus	32
4.5 Infrapunaledien valinta	34
4.6 Infrapunaledien asennus	34
4.7 Viimeistely	35
4.8 Yhteenveto	36
5. Ohjelmisto	37
5.1 Tavoitteet	37
5.2 Ohjelmiston rakenne	37
5.3 Ohjelman toimintaperiaate	40
5.4 Testaus	42
5.5 Yhteenveto	44
6. Käyttäjättestaus	46
6.1 Tavoitteet	46
6.2 Testausympäristö	47
6.3 Testauksen rakenne	49
6.3.1 Taustatiedot ja testaussuostumus	49
6.3.2 Järjestelmän kalibrointi	50
6.3.3 Tehtävä 1: Katseella seuraaminen	51
6.3.4 Tehtävä 2: Latenssin arviointi	52
6.3.5 Tehtävä 3: Vapaa palaute	52
6.4 Testikäyttäjät	52
7. Käyttäjätestauksen tulokset	53
7.1 Pilotti	53
7.2 Tehtävä 1: Katseella seuraaminen	54
7.2.1 Koko tehtävän data	54

7.2.2	Tuijotus	58
7.2.3	Tulosten muuttuminen	59
7.3	Tehtävä 2: Latenssin arviointi	60
7.4	Tehtävä 3: Vapaa palaute	60
7.5	Toimintavarmuus	61
7.6	Kameran asemointi	61
7.7	Käyttömukavuus testaushenkilöstön kannalta	61
7.8	Puuttuvat ruudunkaappaukset	62
7.9	Tulosten yhteenveto	63
8.	Pohdintaa ja johtopäätökset	64
	Lähteet	68

LIITTEET

KUVAT

2.1	Zeltzerin kuutio	4
2.2	Jatkumo todellisesta ympäristöstä virtuaaliympäristöön.	5
2.3	Lisätty todellisuus.	6
2.4	Videoneuvottelu.	6
2.5	Teleoperoitava robotti.	7
2.6	Simulaattori virtuaaliympäristössä.	8
2.7	Sensorama.	9
2.8	Lentosimulaattorit.	9
2.9	Silmikkonäyttö.	10
2.10	CAVE.	11
2.11	Katsepolut.	12
2.12	Varhaista katseenseurantalaitteistoa.	12
2.13	Nykykaikaisen katseenseurannan periaatekuva.	13
2.14	Kaupallista katseenseurantalaitteistoa.	13
2.15	Tee-se-itse katseenseurantalasit.	14
2.16	Katseenseurantajärjestelmien hierarkia.	15
2.17	Katseenseurantalasit vaikeasti vammaisella.	16
2.18	Käyttäjän katseen osuma todellisessa ympäristössä.	18
2.19	Katseohjautuva mallipohjainen sovellus.	19
2.20	2D-referenssitaso CAVE-ympäristössä.	20
2.21	Sisäinen ja ulkoinen tarkkuus.	21
3.1	Laboratorion CAVE	22
3.2	Valmiit 3D-katseenseurantalasit heijastinpalloineen	23
3.3	Järjestelmä yleisellä tasolla.	24
4.1	MO-BS80 ja MO-B80-sarjan kamera sekä MO-T2706YC-P.	26
4.2	MO-BS80-sarjan kameroiden kuvanlaatu.	27
4.3	MO-B0804P-P kamera ja kiinnitysalusta.	27
4.4	Käytettäväksi valitun kuvanlaatu.	28
4.5	Ensimmäinen versio 3D-katseenseurantalaseista.	29
4.6	MO-B0804P-P asennettuna 3D-lasien kehykseen.	30
4.7	Suodatinkalvoon tarvittavan aukon määrittämiseen käytetty sinitarramaski.	30
4.8	Toinen versio 3D-katseenseurantalaseista.	31
4.9	Katseenseurantakamera liimattuna runkoon.	32
4.10	EasyCap-merkinen USB-videokaappari.	33
4.11	Sinitarralla kiinnitetty testivalaistus.	35

4.12	Johdotuksen sotkuisuus ennen laitteiston viimeistelyä.	35
4.13	Valmis laitteisto.	36
5.1	Ensimmäinen hahmotelma ohjelmistokokonaisuudesta.	38
5.2	Ohjelmiston päivitetty rakenne Gaze Trackerin kanssa.	39
5.3	Gaze Trackerin graafinen käyttöliittymä.	39
5.4	Kalibroidinäkyttöä vastaavan tason seuraa päätä.	40
5.5	Ohjelmassa käytetty oikean käden koordinaatisto.	41
5.6	Katseen suunnan poikkeama pään suhteen.	41
5.7	Katseen suunnan laskenta maailman koordinaatistossa.	42
5.8	Ohjelman testausta virtuaaliympäristössä.	44
6.1	Testauksessa käytetty virtuaaliympäristö	48
6.2	Testauslaboratorio	48
6.3	Gaze Trackerin kalibroidinäkymä.	50
6.4	Gaze Trackerin kalibroinnin laatua kuvaava näkymä.	51
7.1	1. testikäyttäjän tehtävän 1 osumat	55
7.2	2. testikäyttäjän tehtävän 1 osumat	55
7.3	2. testikäyttäjän katseen osumien pystysuuntainen vaihtelu	56
7.4	3. ja 5. testikäyttäjän koko datan visualisoinnit	57
7.5	4. ja 5. testikäyttäjän koko datan visualisoinnit	57
7.6	Testikäyttäjän tuijotusten visualisoinnit	58
7.7	3. testikäyttäjän ensimmäiset ja viimeiset 10 sekuntia.	59
7.8	5. testikäyttäjän ensimmäiset ja viimeiset 10 sekuntia.	60
7.9	Testikäyttäjien silmien sijainti katseenseurantakameran videossa.	62

TERMIT JA LYHENTEET

Tässä esitellään kootusti työn keskeisimmät termit ja lyhenteet.

CAVE	<i>(Cave Automatic Virtual Environment)</i> Käyttäjän ympäröivä virtuaaliympäristön tuottava laitteisto. [1]
Hydra	<i>(Hydra)</i> Virtuaaliympäristön tuottamiseen käytettävä ohjelma
Infrapunaledi	<i>(Infrared emitter, infrared LED)</i> Infrapunaa säteilevä elektroniikan komponentti, infrapunaemitteri.
Katseenseuranta	<i>(Eye tracking)</i> Menetelmä jolla kerätään tietoa käyttäjän silmänliikkeistä. [4]
Käytettävyys	<i>(Usability)</i> Se vaikuttavuus, tehokkuus ja tyytyväisyys, jolla tietyt määritellyt käyttäjät saavuttavat määritellyt tavoitteet tietyssä ympäristössä. [5]
Liikealusta	<i>(Motion platform)</i> Käyttäjään kohdistuvia virtuaaliympäristön liikkeitä simuloiva laite. [6]
Videokaappari	<i>(Video capture device)</i> Laite joka muuntaa analogisen videosignaalin digitaaliseksi.
Virtuaalitekniikka	<i>(Virtual reality technology)</i> Virtuaaliympäristöjen toteuttamiseen käytettävä tekniikka ja laitteisto.
Virtuaaliympäristö	<i>(Virtual environment)</i> Tietoteknisesti toteutettu keinotekoinen ja todentuntuinen toimintaympäristä [7].
VRPN	<i>(Virtual Reality Peripheral Network)</i> Virtuaalitekniikassa yleisesti käytetty rajapinta virtuaalitekniikan laitteiden käsittelyyn. [8].

1. JOHDANTO

Tämän diplomityön tavoitteena oli kehittää prototyyppi CAVE-ympäristössä (Cave Automatic Virtual Environment) käytettävästä katseenseurantajärjestelmästä ja testata sen toimivuus. CAVE on käyttäjän ympäröivillä 3D-näytöillä varustettu virtuaaliympäristön tuottava laitteisto, joka esiteltiin vuonna 1992 [1]. Järjestelmä rakennettiin Tampereen teknillisen yliopiston Konstruktitekniikan laitoksen virtuaalitekniikan laboratorioon Sandvik Mining and Construction Oy:n (myöhemmin Sandvik) pyynnöstä, koska kohtuuhintaista kaupallista järjestelmää ei ollut saatavilla. Järjestelmän kehitys, samoin kuin testauksessa käytetyn Hydra-ohjelmiston kehitys oli osa Tekes'in VIKSU-hanketta ja samalla tärkein resurssi tuossa kehitystyössä. Hankkeen seurauksena syntyi Savant Simulators Oy, joka pyrkii kehittämään virtuaaliympäristöjen esittämiseen käytettävää Hydra-ohjelmistoa.

Järjestelmän oli tarkoitus olla esiteltävissä vieraileville yrityksille ja sovellettavissa yksinkertaiseen tutkimukseen ilman mittavia jatkokehitystoimenpiteitä. Järjestelmän tässä kehitysvaiheessa ei vielä järjestelmälle asetettu tarkkoja käyttötapauksia. Työn rungon muodostivat laitteiston sekä ohjelmiston suunnittelu, toteutus ja testaus. Lisäksi työhön kuului järjestelmän empiirinen käyttäjätestaus aidossa käyttöympäristössä eli laboratoriossa.

Virtuaaliympäristöt tarjoavat monipuolisia mahdollisuuksia. Niiden avulla voidaan muun muassa pitää virtuaalitapaamisia, esitellä suunnitteluratkaisuja, tehdä käyttäjä ja käytettävyydestestauksia ja etäoperoida laitteita paikoissa, joihin operaattorin ei ole mahdollista tai kannattavaa mennä. Virtuaaliympäristöillä on potentiaalia korvata kalliita prototyypejä ja mahdollistaa testaus lyhemmissä suunnittelusykleissä. Konstruktitekniikan laitoksella virtuaaliympäristöjä kehitetään muun muassa koneenohjaamoiden suunnitteluun yhteistyössä yritysten kanssa. Virtuaaliympäristöjen käyttö tulee yhä kiinnostavammaksi laitteistokustannusten laskiessa ja tietokoneiden laskentatehon kasvaessa.

Katseenseuranta tarjoaa tietoa siitä mihin käyttäjä katsoo. Tietoa katseen ja siten huomion kiinnittymistä eri kohtiin ympäristössä voidaan käyttää hyväksi monella eri tavalla. Käytettävyydestestauksessa katseenseurannalla voidaan esimerkiksi selvittää etsiikö käyttäjä käyttöliittymän elementtejä sieltä, minne suunnittelija ne on sijoittanut. Kokeneisuutta voidaan mitata käyttämällä referenssinä aikaisempaa kokeneiden ja kokemattomien henkilöiden katseenseurannan dataa. Katse voi toimia myös käyttöliittymän syöttölaitteena. Katseenseurantaa on käytetty menestyksekkäästi käytettävyydestestauksessa jo vuosia. Pro-

totyyppien siirtyessä virtuaaliympäristöön pitää katseenseurannan siirtyä perässä.

Koska virtuaaliympäristöjen käyttö tutkimuksen ja suunnittelun tukena on teollisuudessa vasta aluillaan, katseenseurannan toteuttaminen lisää kiinnostusta myös virtuaaliympäristöjä kohtaan. Se on uusi työkalu ja uusi mahdollisuus. Vaikka kaupalliset sovellukset olisivat teknisesti mahdollisia ottaa käyttöön, ne ovat hyvin kalliita. Tässä työssä toteutettu laitteisto on hyvin edullinen ja helposti laajennettavissa ja kehiteltävissä eteenpäin. Vastaavanlaisia on rakennettu aikaisemmin etenkin todellisessa ympäristössä käytettäväksi, mutta niitä ei ole helposti saatavilla ja niiden käyttöönotto ja sovittaminen Konstruktiotekniikan laboratorion ohjelmisto ja laitteistoympäristöön vaatisi joka tapauksessa merkittävää työpanosta. Tässä työssä toteutettu ohjelmisto on yksinkertainen ja sitä on helppo kehittää eteenpäin tarpeen mukaan.

Tämä diplomityö käsittää katseenseurantajärjestelmän laitteiston ja ohjelmiston suunnittelun ja toteutuksen sekä toteutetun järjestelmän testauksen. Katseenseurannan suhteen käsitellään yhden silmän katsetta seuraavaa tekniikka, joka yksinkertaistaa katseen säteeksi. Työn puitteissa ei perehdytä virtuaaliympäristöjen tai katseenseurannan menetelmiin tai sovelluksiin enemmän, kuin työn ymmärtämisen kannalta on välttämätöntä. Ohjelmiston osalta käsitellään lähinnä katseen säteen muodostamista. Katseen törmäyspisteen laskenta virtuaaliympäristössä sekä datan tallennus ja visualisointi eivät olleet osia tätä diplomityötä.

Työ oli luonteeltaan konstruktiiivinen. Konstruktiiivisessa tutkimuksessa tutustutaan aihealueeseen, luodaan innovatiivinen ratkaisu (konstruktio), osoitetaan ratkaisun toimivuus, osoitetaan yhteydet teoriaan ja tutkimuksen uutuusarvo ja tarkastellaan ratkaisun sovellusmahdollisuuksien laajuutta [2]. Ratkaisun toimivuus osoitettiin empiirisellä käyttäjätestauksella joka oli konstruktion muodostamisen kanssa tämän työn keskiössä. Koska työssä toteutettiin ensimmäinen prototyyppi, käytettävyyden osalta painopiste oli konstruktion käyttökelpoisuudessa. Käyttäjäkeskeinen suunnittelu [3], jossa käyttäjät ovat tiiviisti mukana kehitysprosessin eri vaiheissa, ei ollut tämän työn lähtökohtana. Tässä kehitysvaiheessa haluttiin kehittää prototyyppi esittelytarkoitukseen, eikä varsinaisten käyttötapauksien ja loppukäyttäjien tunnistaminen ollut tavoitteena.

Luvussa 2 esitellään työn ymmärtämiseksi tarpeelliset käsitteet ja tarjotaan yleiskatsaus virtuaaliympäristöihin ja katseenseurantaan. Mikäli virtuaaliympäristöt ja katseenseuranta ovat lukijalle tuttuja, tämän luvun voi ohittaa.

Luvussa 3 esitetään yleiskatsaus toteutettuun järjestelmään ja sen kontekstiin. Luvussa esitellään Konstruktiotekniikan laitoksen virtuaalitekniikan laboratorio ja sen laitteistoympäristö ja kuvataan toteutetun järjestelmän käyttäjät. Luvun tarkoituksena on antaa lukijalle kokonaiskuva, jota seuraavat luvut täydentävät ja tarkentavat. Tämä luku on syytä lukea myöhempien lukujen ymmärtämiseksi.

Luvuissa 4 ja 5 esitetään toteutettu laitteisto ja ohjelmisto ja niiden kehitystyö. Merkittävimmät kehitysvaiheet on pyritty esittelemään kronologisessa järjestyksessä. Luvuis-

sa kerrotaan aluksi alkuperäiset tavoitteet, jonka jälkeen käydään läpi kehitysprosessi ja sen aikana tehdyt ratkaisut. Jos lukijaa kiinnostaa lähinnä lopullinen kokoonpano, riittää lukujen lopusta löytyvien yhteenvetojen lukeminen. Vähintään yhteenvetojen lukeminen edesauttaa käyttäjätestauksen ja sen tulosten ymmärtämistä.

Luvussa 6 esitellään järjestelmälle tehty empiirinen käyttäjätestaus. Ensin käydään läpi testauksen tavoitteita ja testausympäristö. Sitten esitellään testauksen rakenne, testauksen eri vaiheet ja käydään läpi kaikki testitehtävät. Lopuksi esitellään kootusti testiin rekrytoidut testikäyttäjät. Tämä luku on syytä lukea testauksen tulosten ymmärtämiseksi.

Luvussa 7 käydään läpi testauksen tulokset. Pilottitestauksen osalta kerrotaan miten testausta muutettiin ennen varsinaisia testejä. Tulokset esitellään joka tehtävän osalta ja lisäksi eritellään muutama keskeinen osa-alue tarkemmin. Hyvän yleiskäsityksen tulokista saa selaamalla kuvat ja lukemalla luvun lopusta löytyvän yhteenvedon.

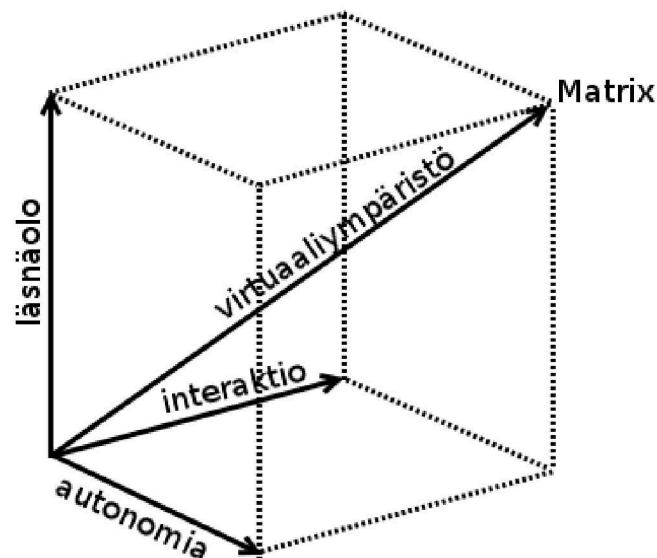
Luvussa 8 on työn pohdintaa ja tulosten arviointia. Tehtyä laitteistoa, ohjelmistoa ja testausta sekä niiden kehitystyötä arvioidaan kriittisesti ja esitetään ehdotuksia jatkokehitykseen ja jatkotutkimukseen.

2. LÄHTÖKOHDAT

Tässä luvussa selvitetään virtuaaliympäristöihin ja katseenseurantaan liittyvät tämän työn kannalta oleelliset käsitteet. Lisäksi esitellään muutamia katseenseurannan ja virtuaaliympäristöjen sovelluksia. Lopuksi tarkastellaan katseenseurannan soveltamista virtuaaliympäristöön ja käydään läpi tällaisen järjestelmän testauksen tärkeimmät aspektit.

2.1 Virtuaaliympäristöt työkaluna

Virtuaaliympäristö voidaan määritellä tietoteknisesti toteutetuksi keinotekoiseksi ja todentuntuiseksi toimintaympäristöksi [7]. Aihealueen käsitteet eivät kuitenkaan ole kovin vakiintuneita [9]. Zeltzerin mukaan [10] virtuaaliympäristön määrittää virtuaaliympäristön autonomisuus, käyttäjän läsnäolon tunne ja vuorovaikutus virtuaaliympäristön kanssa. Mikäli jokainen näistä kolmesta komponentista täydellistyisi, virtuaaliympäristö olisi keinotekoinen todellisuus, jota käyttäjä ei voisi erottaa aidosta todellisuudesta [11]. Tällainen lähes täydellinen virtuaaliympäristö on tuttu elokuvasta The Matrix [13]. Zeltzerin kuutio kuvassa 2.1 havainnollistaa virtuaaliympäristön dimensioita.



Kuva 2.1: Zeltzerin kuutio [11] mukaillen. Virtuaaliympäristön autonomisuuden, käyttäjän läsnäolon tunteen ja vuorovaikutuksen täydellistyessä käyttäjä ei voi erottaa virtuaaliympäristöä oikeasta ympäristöstä.

Virtuaaliympäristön autonomisuudella tarkoitetaan sen kykyä reagoida todellisuutta vastaavalla tavalla. Autonomisessa virtuaaliympäristössä esimerkiksi lattialle putoava hauras esine hajoaa ja palaset sinkoilevat fysiikan lakien mukaisesti tai virtuaalisen auton kuljettajan kääntäessä avainta ajoneuvon virtalukossa ajoneuvo käynnistyy. Interaktiolla eli vuorovaikutuksella tarkoitetaan mahdollisuutta vaikuttaa virtuaaliympäristön ja sen objektien tilaan todellisuutta vastaavalla tavalla. Kyse on siis siitä, voiko käyttäjä ylipäänsä ottaa virtuaaliympäristön haurasta esinettä käteensä ja heittää tai pudottaa sitä lattialle tai laittaa avainta ajoneuvon virtalukkoon. Läsnaololla tarkoitetaan sitä, kuinka syvästi käyttäjä tuntee olevansa sisällä virtuaaliympäristössä. [10]

Läsnaolon tunteeseen vaikuttaa virtuaaliympäristön toteuttamiseen käytetyn laitteiston immersivisyys [14]. Immersio ja läsnaolo sekoitetaan helposti keskenään. Ne ovat kuitenkin kaksi eri asiaa. Immersio on mitattavissa oleva laitteiston kyky tuottaa todellisuutta vastaavia aistiärsyksiä. Läsnaolon tunne on subjektiivinen kokemus. [15]. Käyttäjä siis upotetaan laitteiden ja niiden tuottamien ärsykkeiden keskelle siinä toivossa, että käyttäjä kokee keinotekoisien ympäristön olevan oikea. Läsnaolon tunnetta voidaan mitata esimerkiksi kyselyllä [16].

Virtuaaliympäristön ei kuitenkaan tarvitse olla kauttaaltaan keinotekoinen. Se voi olla todellisen ja keinotekoisien ympäristön sekoitus. Lisätyksi todellisuudeksi kutsutaan sitä, kun todelliseen ympäristöön lisätään keinotekoisia elementtejä [12]. Milgram ja Tagermura [17] ovat esittäneet mallin siitä, kuinka todellisesta ympäristöstä voidaan liukuen siirtyä virtuaalisen ja todellisen ympäristön sekoituksen kautta täysin keinotekoiseen ympäristöön ja takaisin, lisäten tai vähentäen keinotekoisien ympäristön määrää (kuva 2.2).



Kuva 2.2: *Jatkumo todellisesta ympäristöstä virtuaaliympäristöön. Täysin virtuaalisessa ympäristössä ei ole todellisen ympäristön objekteja. Lisätyssä virtuaalisuudessa virtuaaliympäristössä on todellisen ympäristön objekteja. Lisätyssä todellisuudessa todellisessa ympäristössä on virtuaalisia objekteja. Sekä lisätty todellisuus että lisätty virtuaalisuus on osa todellisuuden ja virtuaalisuuden sekoitusta, joka kattaa välin todellisesta ympäristöstä virtuaaliseen ympäristöön. Mukailtu lähteestä [17].*

Tunnetuin ja tietävästi vanhin lisätyn todellisuuden sovellus on hävittäjälentäjien maailtietojen lisääminen lentäjän näkymän päälle. Isoilla värinäyttöillä ja korkealaatuisilla kameroilla varustettujen älypuhelimien yleistyessä lisätty todellisuus on saatavilla yhä useamman taskusta. Älypuhelimien paikannustiedon ja videokameran avulla maiseman päälle voidaan lisätä esimerkiksi tietoa nähtävyyksistä. Kuvassa 2.3 on lentäjän näkymä,

johon on lisätty lentäjälle tarpeellista tietoa, ja maisema, johon älypuhelimien "läpi" on lisätty tietoa etäällä olevista kohteista. Lisätty virtuaalisuus on huomattavasti lisättyä todellisuutta harvinaisempaa.



Kuva 2.3: Esimerkkejä lisäystä todellisuudesta. Lentäjän näkymään on lisätty tarpeellista tietoa kuten keinohorisontti ja kompassi. Älypuhelimien "läpi" katsottaessa maisemaan voidaan lisätä tietoa esimerkiksi nähtävyyksistä tai vapaista asunnoista. Kuvat lähteestä [18].

Kokonaan virtuaalisen ympäristön vastakohtana käyttäjälle voidaan tuottaa kokemus muualla olevasta todellisesta ympäristöstä [11]. Tällöin puhutaan etäläsnäolosta [12]. Käyttäjä ei kuitenkaan voi olla fyysisessä vuorovaikutuksessa ympäristön kanssa. Ehkä tunnetuin etäläsnäolon sovellus on videoneuvottelu, jossa osa neuvotteluun osallistuvista on paikalla videon välityksellä (kuva 2.4).



Kuva 2.4: Videoneuvottelussa osa osallistujista on läsnä videon välityksellä. Kuva lähteestä [19].

Kun etäläsnäoloon liitetään vuorovaikutusmahdollisuus, puhutaan teleoperoinnista [12]. Teleoperointi mahdollistaa toiminnan ympäristössä, jonne operaattori ei ole mahdollista tai kannattavaa mennä. Kirurgi voi esimerkiksi teleoperoiden leikata kentällä haavoittuneen sotilaan lentokoneesta käsin [20]. Teollisuudessa voidaan käyttää teleoperoituja

huolto-robotteja esimerkiksi säteilyvaarallisissa ympäristöissä. Kuvassa 2.5 teleoperoitu robotti tutkii räjähdysvaarallista kohdetta. Teleoperoinnin täydellistymä on tuttu elokuvasta Avatar [21], jossa henkilön mieli voitiin siirtää toiseen kehoon tai pystyi toimimaan toisen kehon kautta.



Kuva 2.5: Poliisin teleoperoitava robotti tutkii epäonnistuneesta itsemurhaiskusta epäiltyä räjähtämättömien räjähteiden varalta Israelissa. Kuva lähteestä [22].

Etäläsnäolon ja teleoperoinnin tapauksessa käyttäjälle välitetään todellista ympäristöä. Simulaatio on todellisen maailman ominaisuuksien imitointia tietoteknisesti [23]. Simuloinnissa muodostetaan teoreettisen tai todellisen järjestelmän malli, malli suoritetaan ja suorituksen tulokset analysoidaan [24]. Konstruktiotekniikan laitoksella on jo pitkään tutkittu ja kehitetty työkoneiden simulointia virtuaaliympäristössä. Koneesta ja ympäristöstä luodaan interaktiivinen virtuaalinen malli, jota käyttäjä voi kontrolloida. Simulaattorin avulla voidaan tutkia tuotekehityksen varhaisessa vaiheessa uusien suunnitteluratkaisuiden toimivuutta. Tämä on tuotekehityksessä merkittävä kilpailuetu. Tuotekehityksen nopeus ja asiakkaan tarpeiden ymmärtäminen ovat keskeisiä tuotteen menestyksen tekijöitä [27]. [25, 26] mukaan jopa 70% tuotteen koko elinkaaren kustannuksista riippuu tuotekehityksen varhaisessa vaiheen päätöksistä. Kuvassa 2.6 näkyy Sandvikin kaivoskoneen simulaattori.



Kuva 2.6: Käyttäjä ajaa Sandvik Oy:n kaivoskoneen simulaattoria Tampereen teknillisen yliopiston Konstruktitekniikan laitoksella.

2.2 Virtuaaliympäristön visualisointi

1929 Edward Link kehitti ensimmäisen mekaanisen lentosimulaattorin. Laitteessa ei ollut näyttöä, mutta se tarjosi synteettisen ympäristön lentämisen ja navigoinnin opetteluun. Ensimmäinen immersiiivinen virtuaaliympäristö oli Sensorama (1962), joka tuotti käyttäjälle kokemuksen moottoripyöräretkestä Manhattanin halki. Laite näytti stereoskooppista videokuvaa, tuotti muun muassa tärinää ja jopa tuoksua. Kuvassa 2.7 näkyy Sensoraman juliste. [9]



Kuva 2.7: Ensimmäinen immersiivinen virtuaaliympäristön tuottava laite vuodelta 1962 oli Sensorama. Juliste lupaa, että laite vie käyttäjän "toiseen maailmaan" useita eri tekniikoita hyödyntäen. Kuva lähteestä [28].

Sensorama päätyi huvipuistokäyttöön, mutta lentosimulaattorit ovat kehittyneet ja yleistyneet valtavasti. Kuvassa 2.8 näkyy Linkin lentosimulaattori ja nykyaikainen Boeing-simulaattori ulkoa ja sisältä.



Kuva 2.8: Vasemmalla Edward Linkin kehittämä ensimmäinen lentosimulaattori ja oikealla nykyaikainen Boeing-simulaattori ulkoa ja sisältä. Kuvat lähteistä [9, 29].

Koska näköaisti on ihmisen aisteista hallitsevin, näköhavainnon tuottaminen virtu-

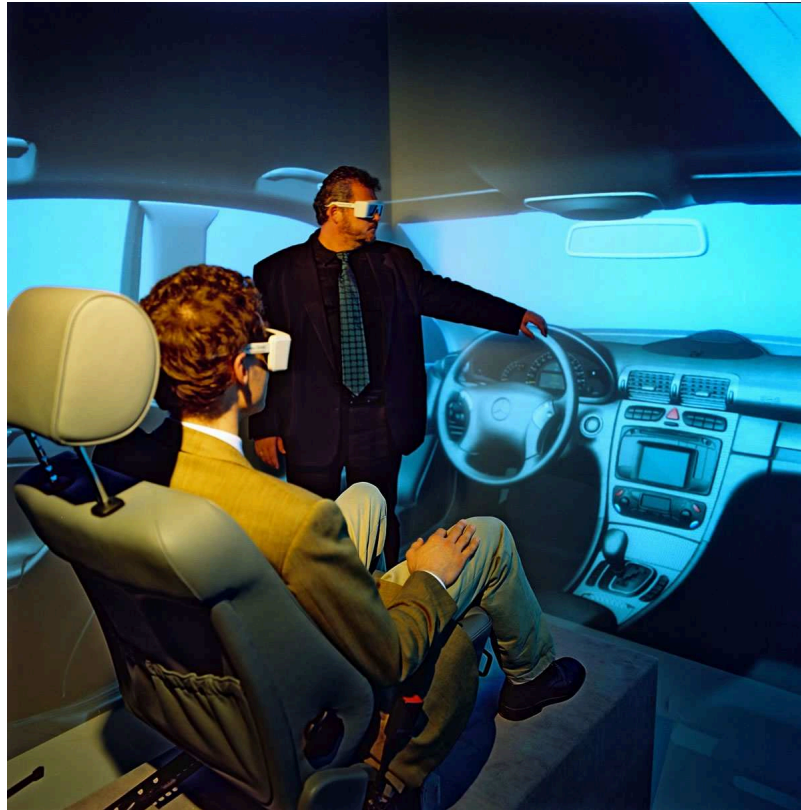
aalisesta ympäristöstä on ensisijaisen tärkeää [11]. Ihmisen silmät ovat erillään toisistaan. Ne näkevät maailman hieman eri kohdasta. Lukija voi kokeilla tätä avaamalla vuoroin vasemman ja vuoroin oikean silmänsä. Silmien näkymät poikkeavat toisistaan. 3D-näyttötekniikoiden avulla tätä tilannetta pyritään jäljittelemään, jotta katsoja saisi vaikutelman aidosta kolmiulotteisesta ympäristöstä. Vasemmalle ja oikealle silmälle näytetään virtuaaliympäristöstä silmien paikkoja vastaavat näkymät.

Näyttötekniikoita on pääasiassa kahdenlaisia, käyttäjään sidottuja ja käyttäjästä irrallisia. Käyttäjän päähän puettava 3D-näyttölaite eli silmikkonäyttö tai pääripusteinen näyttö (Head Mounted Display, HMD) sai alkunsa samoihin aikoihin Sensoraman kanssa. Silmikkonäytössä päähän puettava laite näyttää molemmille silmille omaa kuvaa. Esimerkki silmikkonäytöstä kuvassa näkyy kuvassa 2.9.



Kuva 2.9: 5DT HMD 800 sarjan silmikkonäyttö. Kuva lähteestä [30].

Vaihtoehto silmikkonäytölle on ensimmäisen kerran vuonna 1992 esitelty CAVE. CAVE [1] on käyttäjän ympäröivillä 3D-näyttöillä varustettu laitteisto. Mittaamalla pään paikkaa ja orientaatiota suhteessa virtuaaliympäristöön, molemmille silmille lasketaan sen paikkaa virtuaaliympäristössä vastaava näkymä. Käyttäjä pitää päässään laseja joiden linssit päästävät läpi vain kyseiselle silmälle tarkoitetut kuvat. Molempien silmien nähdessä paikkaansa vastaavan näkymän syntyy illuusion kolmiulotteisesta ympäristöstä. Kuvassa 2.10 näkyy Mercedes-Benzin suunnittelua tukeva CAVE.



Kuva 2.10: Mercedes-Benzin CAVE. Kuva lähteestä [31].

2.3 Katseenseuranta tutkimuksen tukena

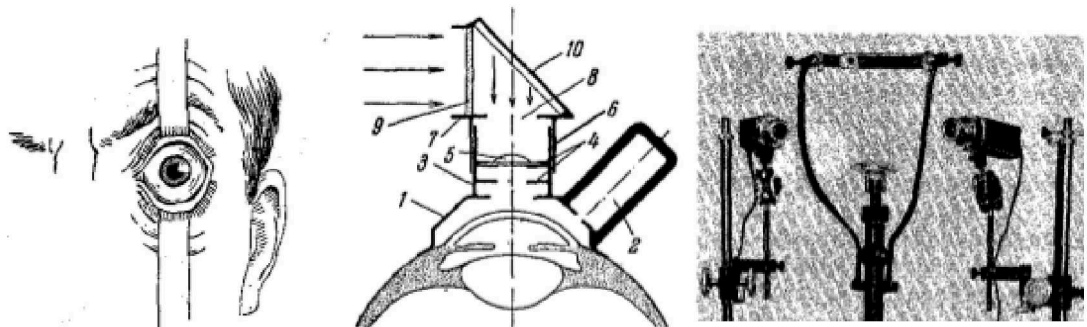
Yleensä katseen suunta kertoo, mihin huomiomme on kohdistunut [32]. Poikkeuksena saattaa olla tilanteet, joissa tuijotamme jonnekin ja huomiomme on kohdistunut muualle [33]. Katseenseuralla tarkoitetaan menetelmää, jossa ihmisen katseen suuntaa seurataan [4]. Katsetta seuraamalla voidaan siis selvittää katsojan huomion siirtymistä kohteesta toiseen.

Katseen kohdistumista tiettyyn kohtaan kutsutaan fiksaatioiksi [4]. Fiksaatioiden välillä tapahtuu nopea silmien liikkuminen. Tätä liikettä kutsutaan sakkadiksi [4]. Sakkadit kestävät noin 30-120 millisekuntia ja fiksaatioiden tyypillinen kesto on 200-600 millisekuntia [34]. Katsepolku muodostuu sarjasta fiksaatioita ja sakkadeja [4]. Ihminen kerää visuaalista informaatiota ainoastaan fiksaatioiden aikana [35] ja 90% katseluajasta kuluu fiksaatioihin [36]. Kuvassa 2.11 on kuva katsepoluista kolmen minuutin ajalta tarkasteltaessa kuvaa eri tarkoituksissa.



Kuva 2.11: Tunnettu esimerkki katsepoluista. Yarbuksen tutkimus osoitti, että annettu tehtävä vaikuttaa katsepolkuun. Kuva on muokattu. [37]

Katseen seuraamisen mahdollistavia teknologioita on useita. Ensin katsetta seurattiin luonnollisesti tarkkailemalla käyttäjän silmiä. Videoon perustuvalla katseenseurannalla tarkoitetaan menetelmää, jossa katseen suuntaa tunnistetaan videokuvasta. Ennen digitaalista videota ja tietokoneita käyttäjää kuvattiin filmikameralla ja katseen suunta tunnistettiin videolta manuaalisesti. Yarbus [37] käytti tutkimuksessaan silmään kiinnitettäviä imukuppeja ja filmikameroita (kuva 2.12).

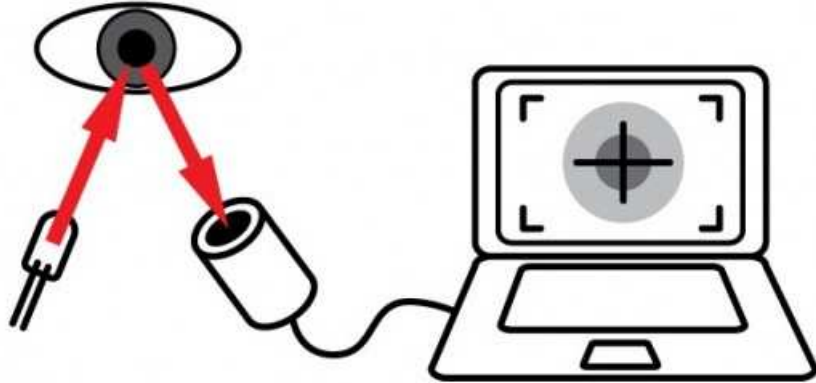


Kuva 2.12: Yarbuksen käyttämään katseenseurantalaitteistoon kuului erilaisia silmään kiinnitettäviä imukuppeja. Silmä piti teipata auki, ettei luomien räpyttely irrotaisi käytettävää imukuppia. Silmän liikkeet tallennettiin filmikameralla. Kuva on muokattu. [37]

Nykyaikaiset katseenseurantajärjestelmät ovat edellistä hienovaraisempia ja tunnistavat ohjelmallisesti katseen suunnan digitaalisesta videosta. Videoon perustuvia nykyaikaisia katseenseurantalaitteistoja on pääasiassa kahdenlaisia: päähän puettavia ja käyttäjästä irrallisia. Päähän puettavassa laitteistossa silmää, jonka katsetta seurataan, kuvaava kamera puetaan päähän esimerkiksi silmälasien sankaan tai kypärään kiinnitettynä. Käyttäjistä irrallisessa laitteistossa videokamera on esimerkiksi pöydällä. Videoon perustuvien katseenseurantalaitteistojen etuna on niiden halpa hinta, suhteellisen hyvä tarkkuus

ja yhteensopivuus muun käytettävän laitteiston kanssa. [38]

Kuvassa 2.13 näkyy nykyaikaisen katseenseurannan periaatekuva. Silmää valaistaa joko näkyvällä valolla tai infrapunalla. Kamera kuvaa silmää ja katseenseurantaohjelmisto tunnistaa katseen suunnan.



Kuva 2.13: Nykyaikaisen katseenseurannan periaatekuva. Silmää valaistaa joko näkyvällä valolla tai infrapunalla. Katseenseurantaohjelmisto tunnistaa videokameran kuvasta katseen suunnan. Kuva on muokattu lähteestä [39]

Kuvassa 2.14 on Tobiin kaupallinen katseenseurantalaite, jossa kamerat on piilotettu näytön alareunaan, ja SensorMotoric Instrumentsin päähän puettavat katseenseurantalasit. Katseenseurantalaseissa on silmien välissä ympäristöä käyttäjän näkökulmasta kuvaava kamera, jonka kuvan suhteen katsetta seurataan. Kaupalliset korkealaatuiset katseenseurantajärjestelmät ovat hintavia. Esimerkiksi SensorMotoric Instrumentsin tekemä tarjous pelkistä katseenseurantalaseista [40] ilman veroja ja tulleja oli 19800 euroa.



Kuva 2.14: Vasemmalla ruotsalaisen Tobiin katseenseurantalaite, jossa kamerat on piilotettu näytön alareunaan. Oikealla SensorMotoric Instrumentsin päähän puettavat katseenseurantalasit. Kuvat lähteistä [41, 40]

Katseenseurantalaitteen ei kuitenkaan tarvitse olla kallis. Vaikka valmiilla kaupallisella ratkaisulla on vahvuutensa, monelle useiden tuhansien eurojen järjestelmä on kohtuuttoman kallis. Merkittävää on myös edullisten ratkaisujen hyvä suorituskyky kalliisiin kaupallisiin järjestelmiin verrattuna [42, 43]. Yksinkertaisimmillaan katseenseurantalaitteena voidaan käyttää suukapulaan kiinnitettyä web-kameraa [42]. Tällainen kokoonpano on ilmeisen epäkäytännöllinen. Edullinen ja käytännöllinen ratkaisu on kiinnittää pieni-kokoinen kamera varren päähän esimerkiksi suojalasien sankoihin. Esimerkkejä tällaisten edullisten laitteistojen rakentamisesta ovat [44, 45]. Kuvassa 2.15 on tee-se-itse katseenseurantalasit [45] mukaan.



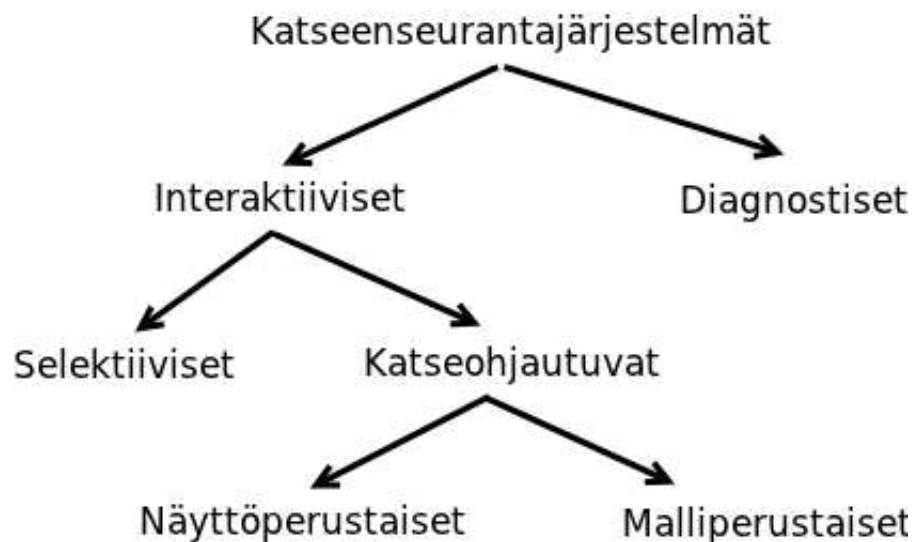
Kuva 2.15: Tee-se-itse katseenseurantalasit, jotka on rakennettu kiinnittämällä katseenseurantakamera alumiinivarren päähän modifioitujen suojalasien eteen. [45]

Videon perustuvassa katseenseurantajärjestelmässä videosta tunnistetaan silmän asento esimerkiksi tunnistamalla pupillin keskikohta. Riippuen algoritmista myös käytettävän infrapunavalaistuksen tuottamia heijastuksia sarveiskalvolta voidaan hyödyntää. Silmän asento sidotaan järjestelmän kalibroinnin yhteydessä esimerkiksi tietokoneen näytön pikselikoordinaatteihin. Kalibroinnin aikana käyttäjä kohdistaa katseensa kalibroitinäytöllä näytettäviin kohteisiin ja ohjelmisto luo kuvauksen silmän asennon ja pikselikoordinaattien välille. Kalibroinnin jälkeen tällainen järjestelmä tarjoaa katseen osumakohdan näytön pikselikoordinaatteina. [38]

Ilmaisia katseenseurantaohjelmia käytettäväksi tavallisella tietokoneella on useita. Eräs tällainen ohjelma on Gaze Tracker [46], joka on osoittautunut hyväksi [42, 43]. Gaze Trackeria voidaan käyttää sekä päähän puettavan katseenseurantalaitteen että käyttäjästä erillisen kamerasen kanssa. Gaze Tracker tunnistaa videokuvasta pupillin keskikohdan ja se osaa käyttää käyttäjästä erillistä kameraa käytettäessä pään liikkeiden kompensointiin valaistuksen heijastuksia sarveiskalvolta.

Katseenseurannan sovellukset ovat moninaiset. Kuvassa 2.16 näkyy katseenseuranta-

järjestelmien hierarkia. Järjestelmät jakautuvat ensinnäkin diagnostisiin ja interaktiivisiin. Diagnostisella järjestelmällä tarkoitetaan järjestelmää, joka kerää objektiivista ja kvantitatiivista dataa käyttäjän huomion siirtymisestä kohteesta toiseen. Diagnostisella järjestelmällä voidaan esimerkiksi tutkia huomaako käyttäjä näytöllä näkyvän mainoksen. Interaktiiviset järjestelmissä katseenseurantaa käytetään vuorovaikutteisesti eli käyttäjän katseen vaikuttaa järjestelmän tilaan. Interaktiiviset järjestelmät jakautuvat selektiivisiin ja katseohjautuviin. Selektiivisessä järjestelmässä katsetta käytetään valitsimena, kuten esimerkiksi tietokoneen hiirenä. Katseohjautuvissa järjestelmissä katseen suuntaa käytetään käyttäjälle näytettävän näkymän muokkaamiseen. Näyttöperustaisessa katseohjautuvassa järjestelmässä näytölle piirrettävän kuvan ominaisuuksia, kuten resoluutiota muutetaan katseen suunnan funktiona. Malliperustaisissa järjestelmissä näytölle piirrettävän kuvan perustana olevien mallien tai objektien ominaisuuksia, kuten 3D-ympäristön objektien kompleksisuutta muutetaan katseen suunnan funktiona. [38]



Kuva 2.16: Katseenseurantajärjestelmien hierarkia. Mukailtu lähteestä [38].

Esimerkkinä interaktiivisesta selektiivisestä toiminnasta mainittakoon katseenseuran käyttäminen käyttöliittymän syöttölaitteena. Erityisen merkittävää tämä on vaikeasti vammaisille, joille katseenseuranta saattaa olla ainoa saatavilla oleva syöttölaitevaihtoehto. EyeWriter [47], kuvassa 2.17, kehitettiin vaikean sairauden vammauttamalle graffiti-maalarille. Sovellus on tarkoitettu graffitien maalaamiseen. EyeWriter tarjoaa verkkosivullansa avoimen lähdekoodin ohjelman ja tee-se-itse-ohjeet oman katseenseurantalaitteen rakentamiseksi. Kocejko et al. [48] esittelivät samantapaisen järjestelmän, jossa vammautuneen käyttäjän käyttämä näyttö tunnistettiin kolmannen, ympäristöä kuvaavan videokameran kuvasta. Tämän järjestelmän oli tarkoitus toimia katseella ohjattavana hiirenä.



Kuva 2.17: EyeWriter projektin katseenseurantalasit käytössä vaikeasti vammaisella. [47]

Katseen käyttö syöttölaitteena ei kuitenkaan ole mielenkiintoinen vaihtoehto ainoastaan niille, joille tavallisen hiiren ja näppäimistön käyttö ei ole mahdollista. Katseenseurannalla toteutetun katsehiiren on osoitettu olevan nopeampi osoittamisessa kuin tavallisen hiiren. Tutkimuksessa [49] käyttäjä toistuvasti vuoroin valitsi kohteen näytöltä ja vuoroin kirjoitti tekstiä näppäimistöllä ja katseenseurannalla toteutettu valitseminen oli yli 33% nopeampaa kuin perinteinen hiirellä valitseminen. Valitseminen katseenseurannan avulla koettiin myös mielekkäimmäksi. Osa katseenseurannalla saavutetusta nopeudesta selittyi sillä, että käyttäjä saattoi pitää kätensä koko ajan näppäimistöllä. Vaikka katse on nopea ja intuitiivinen osoitin, siihen liittyy myös ongelmia. Katseessa ei esimerkiksi ole luonnollista hiiren napin painallusta vastaavaa toimintoa ja valtaosa katsomisesta ei ole tarkoitettu valitsemiseksi tai osoittamiseksi [50].

Diagnostisilla järjestelmillä voi olla mahdollista esimerkiksi mitata käyttäjien kokeneisuutta. Law et al. [51] tutkivat tähtystysleikkauksen opetteluun käytettävän laitteen käytön ja katseen välistä suhdetta. He tunnistivat erilaisia katseen käyttäytymismuotoja kuten "kohteen katsominen", jossa katse saapui manipuloitavaan kohteeseen ennen leikkaustyökalua, ja "työkalun katsominen", jossa käyttäjä seurasi katseella leikkaustyökalua. Kokeille testikäyttäjille oli tyypillisempää "kohteen katsominen" kun taas kokemattomammille oli tyypillistä "työkalun katsominen". Underwood et al. [52] huomasivat, että Yhdysvaltojen yhdyskuntaoppia opiskelevat kiinnittivät vähemmän huomiota Yhdysvaltojen sisällissodan kuvien keskeisiin elementteihin ja insinööriopiskelijat kiinnittivät vähemmän huomiota oman alansa kuvien keskeisiin elementteihin. Ammattilaiset ikään kuin etsivät yksityiskohtia oman alansa kuvista.

Diagnostinen katseenseuranta on periaatteessa ollut mukana käytettävyytutkimuksen

saralla jo vuodesta 1950, jolloin Fitts et al. [53] tutkivat lentäjien silmänliikkeitä. Osa heidän johtopäätöksistään ovat edelleen ajan tasalla. Heidän tutkimuksensa perusteella voidaan esimerkiksi sanoa, että katseen kohdistuminen näytön elementistä toiseen kertoo miten hyvin elementit on sijoitettu toisiinsa nähden. Menetelmä oli kuitenkin hyvin työläs, koska käyttäjää kuvattiin peilien kautta filmikameralla ja jokainen filmin kuva analysoitiin yksitellen.

Aina 50-luvulta asti katseenseuranta on pidetty hyvin lupaavana, mutta varsinainen käyttö on ollut vähäistä. Tähän on esitetty kolme syytä. Laitteisto ei ole ollut tarpeeksi kehittynyttä sujuvaan käytettävyydestä tutkimukseen ja kerätyn datan analysoiminen ja tulkitseminen on hyvin haastavaa. Laitteiston osalta esimerkiksi tarkkuus ja näytteenottotaajuus ovat rajoittaneet käyttömahdollisuuksia. Lisäksi laitteisto on asettanut rajoitteita esimerkiksi testikäyttäjän normaalille liikkumiselle. Datan analysoinnissa pienetkin muutokset esimerkiksi fiksaatioiden ja sakkadien tunnistamiseen käytetyissä parametreissa saattavat muuttaa tuloksia merkittävästi. Lopulta johtopäätöksiä tekemiseen hyvinkin datan perusteella ei löydy valmiita universaaleja malleja. [54]

Katseenseuranta on kuitenkin askel askeleelta tulossa käytettävyydestä apuvälineeksi. Poole ja Ball [55] esittävät kootusti hyvän listan mitattavissa olevista silmänliikkeistä ja niitä vastaavista merkityksistä. Ehmke ja Wilson [56] liittävät katseenseurannalla mitattavia suureita tiettyihin verkkosivuston käytettävyysongelmiin. Albanesi et al. [57] ovat kehittäneet katseenseurantaan perustuvaa puoliautomaattista verkkosivujen käytettävyydestä jäsennelmää, jonka tarkoituksena on vähentää käytettävyydestä riippuvuutta käytettävyyssiantuntijoiden panoksesta.

Tässä esitellyt muutamat selektiiviset ja diagnostiset järjestelmät ovat vain pintaraapaisu. Kattava tietolähde katseenseurantaan liittyen on [38]. Seuraavassa luvussa esitellään muutama esimerkki katseohjautuvista järjestelmistä virtuaaliympäristöjen yhteydessä.

2.4 Katseenseuranta CAVE-virtuaaliympäristössä

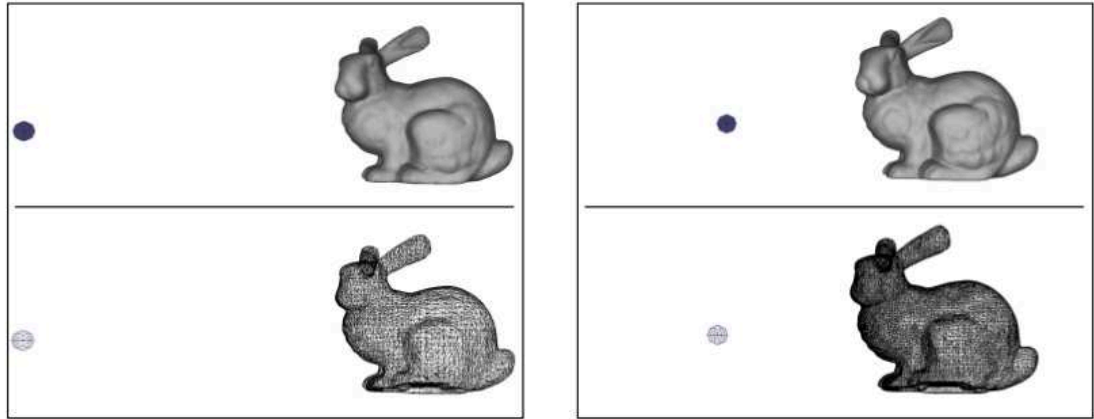
Katseenseuranta todellisessa ympäristössä vaatii kameran todellisen ympäristön kuvaamiseksi. Katseenseurannan tulos näytetään tämän ympäristöä kuvaavan kameran suhteen niin, että kuvassa näkyy esimerkiksi rasti siinä kohdassa johon käyttäjä kulloinkin katsoo. Kuvassa 2.18 käyttäjän katseen osuma todellista ympäristössä esitetään videon päälle piirrettävän pysty ja vaakasuuntaisen mustan viivan avulla. Virtuaaliympäristössä vastaavaa kameraa ei tarvita.



Kuva 2.18: Käyttäjän katseen osumakohdat ajanhetkellä nolla ja 700 millisekuntia aidossa ympäristössä suoritetussa tehtävässä, jossa käyttäjän pyydettiin pestä kädet. [58]

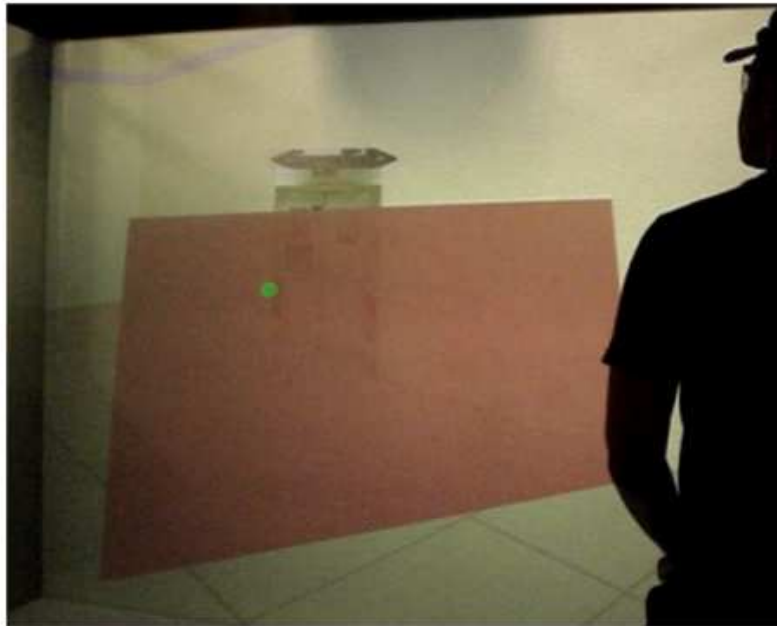
Käyttämällä CAVE-ympäristössä todelliseen ympäristöön tarkoitettua päähän puettavaa katseenseurantalaitetta katseen osumakohta virtuaaliympäristössä voitaisiin ratkaista samaan tapaan kuin tavallisessa ympäristössä. Näin saataisiin katseen osumakohta videolla, jossa näkyisi virtuaaliympäristö. Tämä kuitenkin rajoittaisi merkittävästi katseenseurannan mahdollisuuksia. Kun katseen suunta ja osumakohta lasketaan virtuaaliympäristössä, katsetta voidaan käyttää [59] tapaan esimerkiksi virtuaalisten objektien valitsemiseen eli syöttölaitteena. Koska katseen osuma ei ole vain piste videolla, vaan se kohdistuu johonkin tiettyyn virtuaaliympäristön objektiin, datan analysoinnin automatisoinnin mahdollisuudet paranevat merkittävästi. Esimerkiksi tyypillisiä katsepolkuja voidaan tunnistaa objektien perusteella ja vastata esimerkiksi kysymykseen mitä virtuaalisen koneenohjaamon näyttöä kuljettaja seuraa eniten.

Katseenseurantaa voidaan käyttää virtuaaliympäristössä samaan tapaan esimerkiksi käytettävyydestäutukseen kuin todellisessa ympäristössä, mutta se tuo myös erityisiä lisämahdollisuuksia. Sitä voidaan esimerkiksi käyttää virtuaaliympäristön itsensä parantamiseen. Tällöin on kyse katseohjautuvasta järjestelmästä. Laskentatehon säästämiseksi virtuaaliympäristön laatua voidaan heikentää siellä, minne käyttäjä ei katso, ilman, että käyttäjä kokee merkittävää eroa. Luebke et al. [60] esittelivät mallipohjaisen menetelmän virtuaalimallien kompleksisuuden vähentämiseksi niin, että katsoja ei huomaa eroa. Kuvasa 2.19 näkyy kuinka katseen osumakohdan läheisyys vaikuttaa mallin kompleksisuuteen. Toisaalta visualisointia, kuten virtuaaliympäristön subjektiivista laatua ja syvyysvaikutelmaa voidaan myös parantaa käyttäjän katseen suunnan perusteella [61]. Katseenseurannalla saadaan myös virtuaaliympäristön välityksellä tapahtuvaa kommunikointia parannettua saattamalla ihmismallien silmät liikkumaan oikein [62].



Kuva 2.19: Esimerkki katseohjautuvan mallipohjaisen järjestelmän toiminnasta. Kuvassa täplä esittää katseen osumakohtaa. Katseen osumakohdan läheisyys vaikuttaa käyttäjälle näytettävän mallin kompleksisuuteen. [60]

Katse voidaan yksinkertaisimmillaan ajatella säteeksi ja sen suunta virtuaaliympäristössä saadaan laskettua silmän paikan ja orientaation avulla. Silmän paikka saadaan pään paikannuksen avulla, sillä seurattava silmä pysyy pään suhteen samassa kohdassa. Katseen suunta saadaan laskettua projektiotason määrittämisen 2D-tason suhteen säteenä, joka kulkee silmän paikasta 2D-tason pikselikoordinaatin kautta virtuaaliympäristöön [63, 64]. Katseen osumakohta löytyy laskemalla katseen säteen ja virtuaaliympäristön pintojen leikkauspiste ja se on siis osa katsepolkua. Luku 5.3 selventää virtuaaliympäristöön sovitettua säteeseen perustuvan katseenseurantaohjelmiston toimintaa. Kuvassa 2.20 näkyy Haffegeen [65] toteuttaman järjestelmän 2D-taso virtuaaliympäristössä ja 2D-tasolla katseen osumakohta pallona.



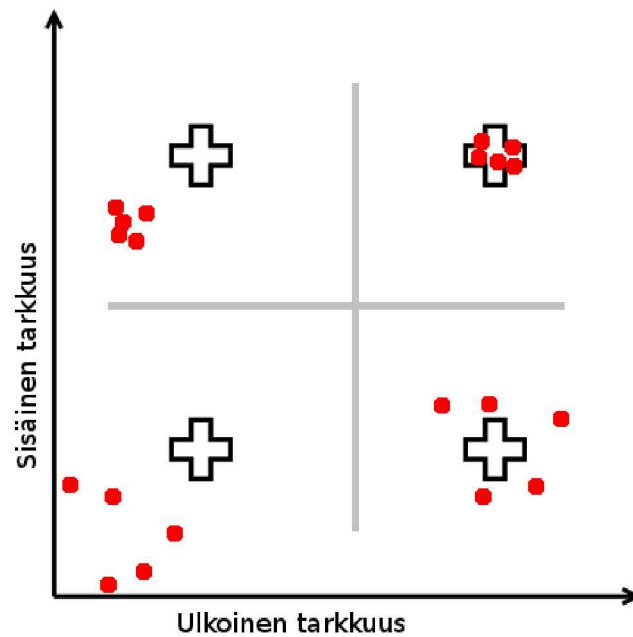
Kuva 2.20: Virtuaaliympäristössä näkyvä taso on se 2D-taso, jonka suhteen järjestelmä antaa pikselikoordinaatteja. Kalibrointi muodostaa kuvauksen 2D-tason ja koordinaattien ja silmän asentojen välille. 2D-taso on sidottu pään paikannukseen ja kelluu aina samassa kohtaa käyttäjän edessä. [65]

Tässä työssä toteutettiin katseenseurantaohjelmisto virtuaaliympäristöön, koska valmista ilmaista ohjelmistoa CAVE-virtuaaliympäristöön ei ole saatavissa. Osana ohjelmistoa käytetty Gaze Tracker tarjoaa kalibrointinäyttöä vastaavan 2D-tason pikselikoordinaatteja. Katseen säteen laskenta virtuaaliympäristön suhteen piti toteuttaa erikseen. Katseen osumakohtaa voidaan seurata reaaliajassa, mutta dataa halutaan myös tallentaa myöhempiä analyysiä varten. Pfeifferin [59] esittämä ratkaisu monokulaarisesta katseenseurantaohjelmistosta on hyvin saman tapainen tässä työssä toteutettuun ratkaisuun verrattuna. Pfeifferin ohjelmisto on kuitenkin edistyneempi. Siinä on kompensoitu pään liikkeitä kalibroinnin aikana ja se tunnistaa mihin virtuaaliympäristön objektiin käyttäjä katsoo tehden objektien valitsemisen mahdolliseksi.

2.5 Katseenseurantajärjestelmän testaus

Ensimmäinen tärkeä testattava ominaisuus on järjestelmän tarkkuus. Sisäisellä tarkkuudella (precision) tarkoitetaan katseen osumakohtien hajontaa samaan kohtaan katsottaessa. Sisäistä tarkkuutta heikentää esimerkiksi kohina pään paikannuksessa ja katseenseurannan videossa. Ulkoisella tarkkuudella (accuracy) tarkoitetaan katseen osumakohtien kasan painopisteen ja käyttäjän katseen todellisen osumakohdan eroa. Ulkoiseen tarkkuuteen vaikuttaa erityisesti kalibroinnin onnistuminen ja katseenseurantalaitteen valuminen. Katseenseurantalaitteen valumisen aiheuttama virhe voidaan ottaa huomioon suorittamalla toinen kalibrointi testauksen lopuksi [38]. Kuva 2.21 havainnollistaa sisäistä ja ulkoista

tarkkuutta.



Kuva 2.21: Ulkoisen tarkkuuden parantuessa osumien kasa siirtyy lähemmäs kohdetta. Sisäisen tarkkuuden parantuessa kasan hajonta pienenee.

Toinen tärkeä ominaisuus on latenssi. Koska tyypillinen fiksaatio kestää lyhimmillään 200 millisekuntia, poikkeuksellisen lyhyen fiksaation voidaan olettaa olevan paljon lyhyempi. Reaaliaikaiseen käyttöön tarkoitettussa sovelluksessa latenssin on oltava kohtuullisen lyhyt. Esimerkiksi käyttäjätestauksen datan analysoinnissa testauksen jälkeen tunnettuja vakioviiveitä voidaan kompensoida. Pfeiffer [59] mittasi katseenseurantajärjestelmän latenssia visuaalisella ping-ohjelmalla, jossa näytölle ilmestynyt täplä katosi järjestelmän tunnistaessa käyttäjän katseen osuman ja uusi täplä ilmaantui. Täpliä ilmaantui kaikkiaan 64. Ongelmana latenssin tulkinnassa oli kuitenkin ihmisen psykofyysiset ja motoriset. Havaitsemiseen, silmien liikuttamiseen ja muuhun ihmisen ominaisuuksista riippuvaan toimintaan kuluvaa aikaa ei voitu ottaa luotettavasti huomioon.

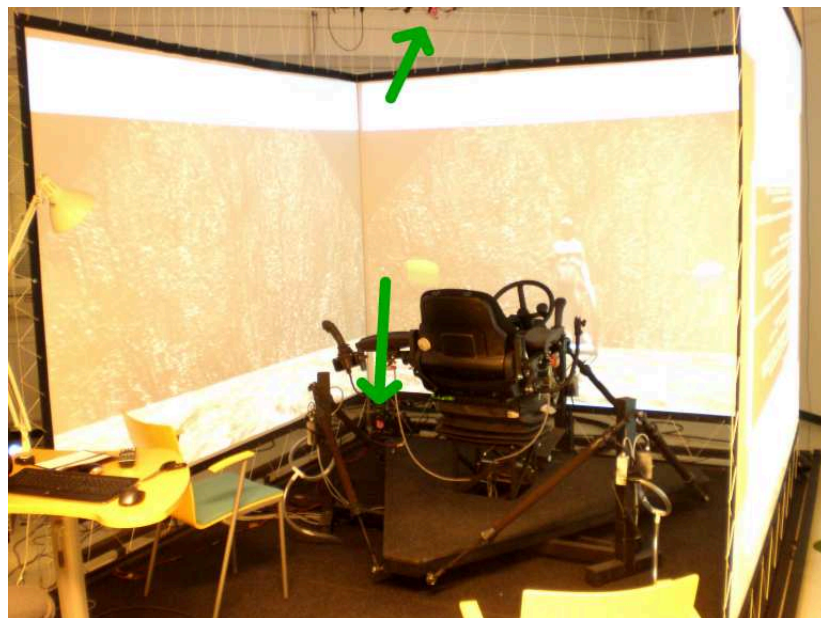
Erityisen tärkeä huomioitava ominaisuus on katseenseurantajärjestelmän käytettävyys. Rubin [66] määrittelee mielekkäästi käytettävyyden koostuvan neljästä asiasta: käyttökelpoisuudesta, käytön helppoudesta, käytön miellyttävyydestä ja opittavuudesta. Latenssi ja tarkkuus ovat tärkeitä käyttökelpoisuuden suhteen. Käytön helppouteen vaikuttaa laitteiston ja ohjelmiston monimutkaisuus. Katseenseurannan käyttö testauksessa on haastavaa ilman laitteisto tai ohjelmisto-ongelmiakin [67].

Järjestelmän käytettävyys tulee huomioida sekä testihenkilöstön että testikäyttäjien näkökulmasta. Molemmat ovat järjestelmän varsinaisia loppukäyttäjiä. Testihenkilöstön pitäisi voida keskittyä varsinaiseen työhönsä. Myös testikäyttäjälle katseenseurannan pitäisi olla mahdollisimman huomaamatonta.

3. JÄRJESTELMÄN KÄYTTÖYMPÄRISTÖ JA YLEISKUVAUS

Katseenseurantajärjestelmä rakennettiin Tampereen teknillisen yliopiston Konstruktiotekniikan laitoksen virtuaalitekniikan laboratorioon Sandvikin pyynnöstä, koska kohtuuhintaista kaupallista järjestelmää ei ollut saatavilla. Sen oli tarkoitus olla esiteltävissä vierailville yrityksille ja sovellettavissa yksinkertaiseen tutkimukseen ilman mittavia jatkokehitystoimenpiteitä. Järjestelmän tässä kehitysvaiheessa ei vielä asetettu tarkkoja käyttötapauksia. Ajatuksena oli, että prototyypin esittelyjen kautta järjestelmälle löytyisi käyttötapauksia jatkokehityksen tueksi.

Virtuaalitekniikan laboratoriossa oli virtuaaliympäristöjen visualisointia varten kolmi-seinäinen CAVE. Näyttöpintana oli vajjereilla jaoteltu katosta ja lattiasta ripustettu taustaprojektiokangas. Näytöt olivat 90 asteen kulmassa toisiinsa nähden. Jokainen näyttö oli 2,66 metriä leveä ja kaksi metriä korkea. Näyttöjen alareuna oli 34 senttimetriä lattiatason yläpuolella. CAVE:n keskellä oli liikealusta [6], jonka oli suunnitellut ja toteuttanut Antti Itäsalo. Kuvassa 3.1 näkyy CAVE ja liikealusta.



Kuva 3.1: Konstruktiotekniikan laitoksen CAVE. Keskellä näkyy liikealusta. Kaksi OptiTrackin paikannusjärjestelmään kuuluvaa kameraa on merkitty kuvaan nuolin.

Virtuaaliympäristön tuottamiseen käytettiin Savant Simulatorsin Hydraa. Hydra on oh-

jelma, joka huolehtii koko virtuaaliympäristön ja sen objektien toiminnallisuudesta, hierarkiasta ja visualisoinnista. Hydra huolehti katseenseurannan datan tallentamisesta ja tulosten visualisoinnista. Virtuaaliympäristö visualisoidaan käyttäjän suhteen, joten käyttäjän silmien paikka pitää tuntea. Silmien paikka lasketaan pään paikan suhteen. Tällä tavoin käyttäjän liikkuesssa CAVE:ssa virtuaaliympäristö käyttäytyy kuten aito ympäristö.

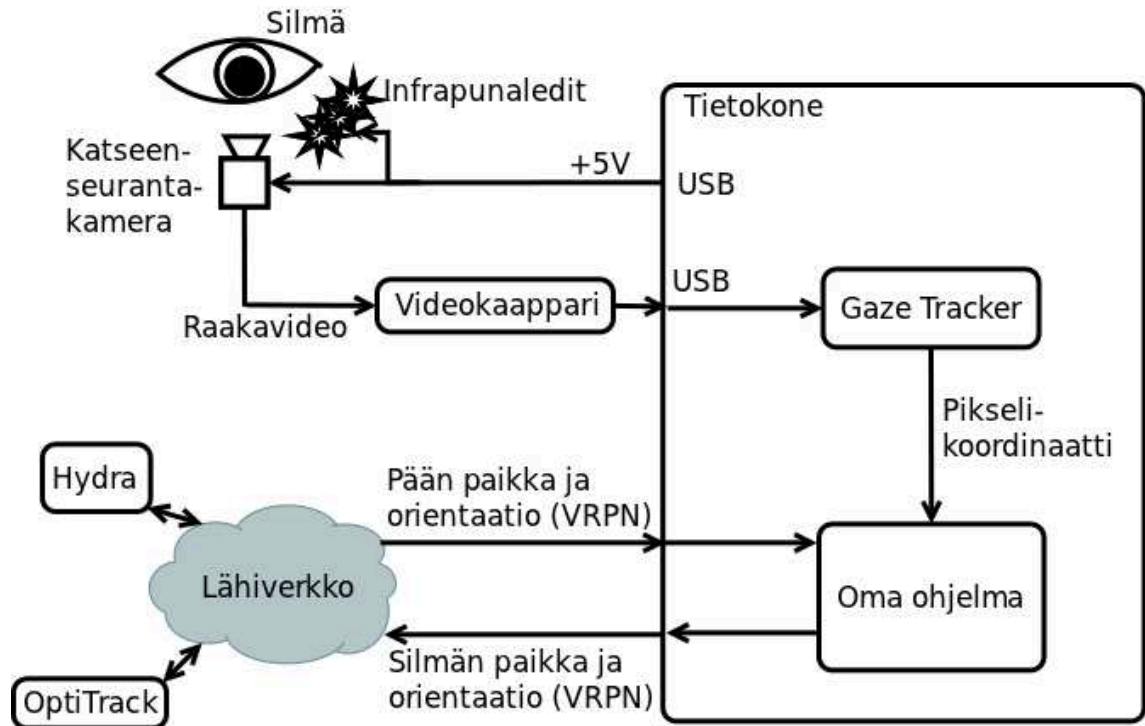
Pään paikannukseen laboratoriossa käytettiin OptiTrackia [68], infrapunakameroilla toimivaa paikannusjärjestelmää. Paikannusjärjestelmä tunnistaa heijastinpalloilla varustetun kappaleen sijainnin ja orientaation heijastinpallojen muodostaman geometrian avulla. Kuvassa 3.1 on merkittynä nuolilla kaksi paikannusjärjestelmään kuuluvaa kameraa.

Näyttöpinnoille heijastettiin kuvaa 3D-videotykeillä, jotka pystyvät näyttämään kuvia normaalin videotykkiin verrattuna kaksinkertaisella nopeudella. Näytettävässä videossa joka toinen kuva kuuluu oikealle ja joka toinen vasemmalle silmälle. Käyttäjä pitää erityisiä 3D-laseja, jotka pimentävät sen silmän linssin, jolle parhaillaan näytettävä kuva ei kuulu. Näin molemmille silmille saadaan näytettyä omaa videokuvaa virtuaaliympäristöstä kutakin silmää vastaavasta kohdasta. Tässä työssä toteutetut 3D-katseenseurantalasit pään paikannukseen käytettävine heijastinpalloineen näkyy kuvassa 3.2.



Kuva 3.2: Valmiit 3D-katseenseurantalasit ja pään paikannuksen tarvitsemat heijastinpallo.

Toteutetun järjestelmän yleiskuvaus näkyy kuvassa 3.3. Katseenseurantakamera kuvaa silmää. Raakavideo eli analoginen video kaapataan tietokoneelle USB-videokaapparilla, joka saa kameran näkymään 2D-tason katseenseurantaa toteuttavalle Gaze Trackerille (katso luvut 2.4 ja 5) web-kamerana. Tässä työssä toteutettu ohjelma vastaanottaa pään paikkaa ja laskee sen ja Gaze Trackerin pikselikoordinaattien avulla silmän paikan ja orientaation virtuaaliympäristössä. Ohjelma tarjoaa tulosta VRPN (Virtual Reality Peripheral Network) [8] rajapinnan yli. VRPN on laajasti käytetty virtuaalitekniikassa.



Kuva 3.3: Järjestelmä yleisellä tasolla. Virta katseenseurantakameralle ja infrapunaLED:ille saadaan tietokoneen USB-portista. Kameran raakavideo kaapataan USB-videokaapparilla, joka saa kameran näkymään Gaze Trackerille web-kamerana. Gaze Tracker tunnistaa videosta pupillin keskikohdan ja laskee katseen osumakohtaa vastaavan pikselikoordinaatin näytöllä, jolle se on kalibroitu. Oma ohjelma laskee OptiTrackin tarjoaman pään paikan ja orientaation sekä Gaze Trackerin pikselikoordinaattien avulla silmän paikan ja orientaation eli katseen suunnan virtuaaliympäristössä. Oma ohjelma tarjoaa laskennan tulosta sitä tarvitseville VRPN palvelimena. Hydra vastaanottaa katseen dataa ja tallentaa sitä sekä piirtää sitä virtuaaliympäristöön.

Virtuaalitekniikan laboratorion ylläpitäjät, jotka ovat toteutetun järjestelmän ensisijaisia käyttäjiä, ovat tekniikan alan ammattilaisia. Heillä voidaan olettaa olevan kokemusta tietotekniikan laitteista ja sovelluksista ammattimaisella tasolla. Toinen merkittävä käyttäjäryhmä, etenkin 3D-katseenseurantalasien suhteen, ovat laboratoriossa käyvät yritysvieraat. Koska tässä työssä toteutetun prototyypin pääasiallinen käyttötarkoitus tullee olemaan toteutetun järjestelmän esittely virtuaaliympäristöjen esittelyjen yhteydessä yritysvieraille, 3D-katseenseurantalasien tulee olla nopeasti puettavissa, eikä niiden pitämisen päässä sovi olla epämiellyttävää. Toisin sanoen 3D-katseenseurantalasien tulee olla edustavat. Tässä työssä keskityttiin kuitenkin ensisijaisesti siihen, että järjestelmän prototyyppi saatiin toimimaan.

4. LAITTEISTO

4.1 Tavoitteet

Tavoitteena oli rakentaa ensimmäinen prototyyppi CAVE-ympäristössä käytettävistä 3D-katseenseurantalaseista. 3D-katseenseurantalasien oli tarkoitus olla yksinkertaiset ja edulliset suorituskyvyn kustannuksella.

Katseenseurantaan käytettävän kameran tuli toimia pimeässä kohtuullisen infrapuna-valaistuksen tukemana niin, että kuvan laatu ja tarkkuus on riittävä käytettävälle ohjelmistolle. Kameran haluttiin olevan pieni, ettei se peitä häiritsevän paljon näkökenttää, ja kevyt, ettei 3D-lasit painaisi kohtuuttomasti. Kameran fokuksen tuli olla tarkka muutaman sentin etäisyydelle, jotta kamera voitaisiin asentaa lähelle 3D-lasien linssiä.

4.2 Kameran valinta

3D-katseenseurantalaseihin soveltuvan kameran etsiminen oli haasteellista. Kameran tuli olla pieni ja kevyt, koska se oli tarkoitus kiinnittää 3D-laseihin. Iso kamera peittäisi näkökenttää ja tekisi 3D-katseenseurantalaseista kömpelöt. Painava kamera tekisi jo ennestään painavista ja helposti valuvista 3D-laseista entistäkin painavammat ja epämiellyttävät.

Lisäksi kameran tuli toimia infrapuna-alueella, sillä virtuaaliympäristöä käytettäessä 3D-lasien takana on lähes pimeää. Valaistusta ei voi toteuttaa näkyvällä valolla, koska silmään suunnattu näkyvä valo olisi käyttäjälle varsin epämiellyttävä.

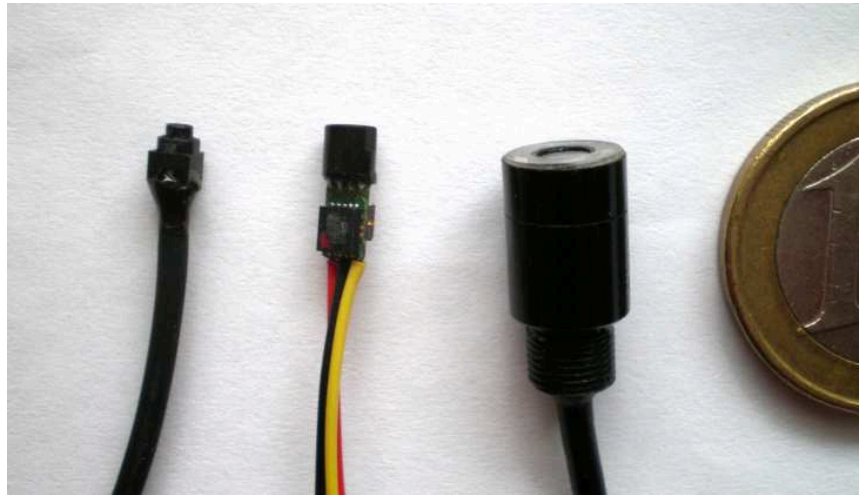
Lääketieteellisiin tarkoituksiin valmistettavia kameroita löytyi suhteellisen helposti hyvinkin pieniä ja katseenseurantaan soveltuvalla resoluutiolla, kuten Mediguksen valmistamat microkamerat [71], mutta lääketieteellisten kameroiden hinta on liian korkea pieniä määriä ostettaessa. Kameran tuli olla halpa ja sen resoluution vähintään 320x240.

Etsintää vaikeutti erilaisten vakoilukameroiden laaja kirjo. Valta osa vakoilukameroista on kuvauksesta huolimatta isoja ja muodoltaan sopimattomia katseenseurantaan. Erityisesti vakoilukameroiden ei voinut olettaa fokuksivan lähelle, vain muutaman senttimetrin päähän kameran linssistä. Katseenseurantakameran tuli tuottaa tarkkaa kuvaa hyvin läheltä silmää.

Kameroiden ensimmäiseksi toimittajaksi löytyi pitkän etsinnän jälkeen Misumi [69]. Ensimmäiset tilatut kamerat olivat MO-T2706YC-P, neljällä infrapunaledillä varustettu mustavalkoinen kamera 648x488 resoluutiolla ja kaksi eri MO-BS80-sarjan kameraa, toinen 105 asteen kuvakulmalla ja toinen 55 asteen kuvakulmalla. MO-BS80-sarjan kame-

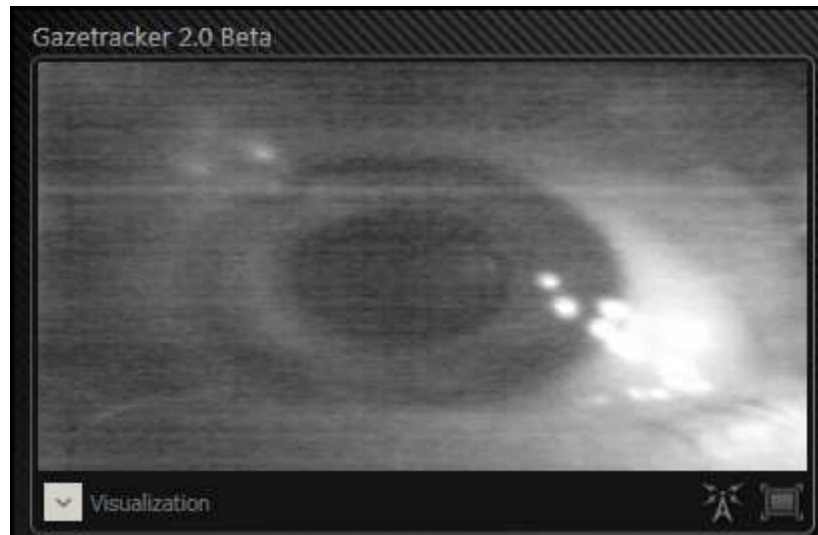
roiden resoluutio oli 320x240.

Hieman myöhemmin tilattiin pari MO-B80-sarjan kameraa. Kameraelementti oli käytännössä sama kuin MO-BS80-sarjan kameroissa, mutta rakenne hieman erilainen. MO-BS80-sarjan kameroissa kameraelementin vaatima piirilevy oli lyhyen johdon päässä kameraelementistä. MO-BS80-sarjan kameroissa kameraelementti oli samalla piirilevyllä muun elektroniikan kanssa. Kuvassa 4.1 näkyy MO-BS80 ja MO-B80-sarjan kamerat sekä MO-T2706YC-P.



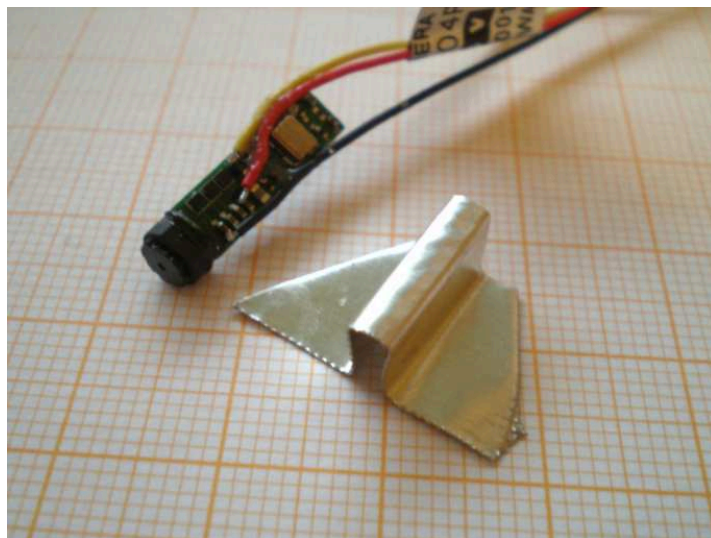
Kuva 4.1: Vasemmalta oikealle MO-BS80 ja MO-B80-sarjan kamera sekä MO-T2706YC-P. Oikeanpuolimmaisena on mittasuhteiden hahmottamiseksi euron kolikko.

MO-T2706YC-P vaikutti lupaavalta vaihtoehdolta, mutta tuotti epätarkkaa kuvaa lähelle kuvattaessa ja se tuhoutui virheellisen kytkennän seurauksena ennen kuin sitä ehdittiin kokeilla katseenseurantaohjelman kanssa. Tilattujen MO-BS80-sarjan kameroiden kuvanlaatu (kuva 4.2) oli liian heikko käytettäväksi valitun katseenseurantaohjelman kanssa.



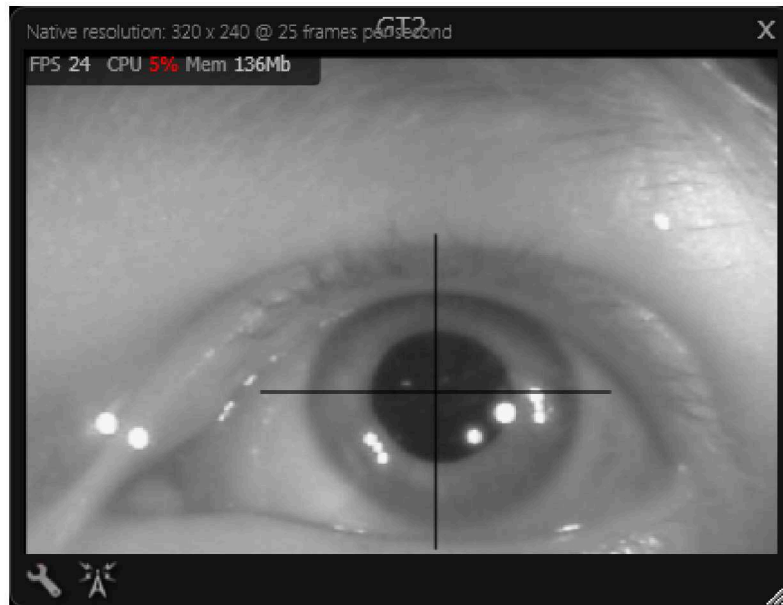
Kuva 4.2: MO-BS80-sarjan kameroiden kuvanlaatu ei riittänyt Gaze Trackerille.

Viimeiseksi tilattiin kokeiltavaksi MO-B0804P-P, kuvassa 4.3 ja MO-T2706YC-P kameraa vastaava kamera, joka näkyy kuvassa 4.9. MO-B0804P-P resoluutio oli peräti 656x496, mutta sen tuottama kuva kohtuullisella infrapunavalaistuksella ei ollut tarpeeksi selkeä. Merkittävin ongelma selvisi kameran mukana tulleesta spesifikaatiosta. Kameran tarkan kuvan alue alkoi vasta noin 60 senttimetrin etäisyydeltä linssistä.



Kuva 4.3: MO-B0804P-P kamera ja valmiiksi taiteltu jäähdytys- ja kiinnitysalusta millimetripaperin päällä.

Uutta MO-T2706YC-P kameraa tilattaessa kamera pyydettiin säätämään niin, että se tuottaa tarkkaa kuvaa läheltä, muutaman senttimetrin etäisyydeltä. Tämä modifioitu kamera osoittautui tarkoitukseen soveltuvaksi kameraksi. Kuvassa 4.4 näkyy tämän kameran kuvanlaatu.



Kuva 4.4: Käytettäväksi valitun kameran kuvanlaatu valmiin infrapunavalaistuksen kanssa.

Kameroiden tilaaminen Misumilta oli hankalaa ja toisinaan turhauttavaa. Toimittaja tarjosi kameroita, jotka eivät ollenkaan soveltuneet haluttuun tarkoitukseen, asiakaspalvelun kielitaito oli heikko ja tilauksissa oli jatkuvasti virheitä. Ongelmien välttämiseksi vastaavia kameroita tilattiin myös Camprolta [70], mutta asiakaspalvelu osoittautui vähintään yhtä kehnoksi. Valmistajien verkkosivujen tarjoamat spesifikaatiot eivät myöskään olleet riittävän tarkkoja. Eri kameroista ilmoitettiin eri arvoja, eikä tarkempaa tietoa ollut helppo saada edes sähköpostitse.

4.3 Kameran asennus

Ensimmäinen yritys istuttaa kameraa 3D-laseihin tehtiin laajakulmaisella MO-BS803-sarjan kameralla. Tarkoitus oli tehdä kameraelementtiin kiinnittyvään johtoon jyrkkä mutka ja liimata kamera 3D-lasien kehyksen sisäpuolelle. Kamera olisi ollut siististi piilossa ja poissa tieltä.

Riittävän jyrkän mutkan aikaansaaminen kameraelementin juureen osoittautui liian vaikeaksi tehtäväksi, koska kameraelementin juuressa oli kova epoksiliima. Epoksiliimaa poistettaessa ja taitosta väännettäessä kameran hyvin ohuet johdot menivät poikki. Kameroita yritettiin tilata ilman kyseistä liimapisaraa. Huolimatta asian näkymisestä tilausvahvistuksessa toimitetuissa kameroissa ei pyydettyä modifikaatiota kuitenkaan ollut.

Seuraavaksi päätettiin kokeilla kapeammalla kuvakulmalla varustetun MO-B80-sarjan kameran asentamista 3D-lasien linssin ulkopuolelle kehyksen alareunaan. Sopivaa paikkaa kameran asennukselle testattiin pientä paperin palaa käyttäen. Kehyksen alareunassa "musta täplä" häiritsi vähiten.

Käytetyissä 3D-laseissa on linssin molemmilla puolilla polarisaatiosuodin. Nämä suodatinkalvot vähentävät merkittävästi linssien läpi pääsevää valoa. Koska kamerat vaativat hyvän valaistuksen suodattimiin piti tehdä reikä. Ensimmäisenä testattiin linssin porausta. Linssin LCD-kenno kärsi porauksesta. Lasikerrosten väliin päätyi vaihteleva määrä ilmaa porauksen levittäessä lasikerroksia erilleen. Kuplat nestekideaineessa aiheuttivat linssiin hallitsemattomia läpinäkymättömiä alueita. LCD-kenno saattoi myös lakata kokonaan toimimasta. Poraamisesta päätettiin luopua, kun huomattiin, että linssien polarisaatiosuotimiin oli mahdollista leikata aukot.

Kameran asennusta varten kehyksen alareunaan koverrettiin kolo ja linssissä oleviin suodatinkalvoihin viillettiin sopiva aukko. Kuvassa 4.5 on kuva ensimmäisestä onnistuneesta kameran asennuksesta.



Kuva 4.5: Ensimmäinen versio 3D-katseenseurantalaseista. MO-B80-sarjan kamera on liimattuna kehyksen alareunaan. Johtojen liitos on suojattu sinitarrralla.

Koska MO-B80-sarjan kameran kuvanlaatu ei riittänyt Gaze Trackerille, seuraavassa kokoonpanossa käytettiin kameraa MO-B0804P-P. Tämän kokoonpanon oli tarkoitus olla lopullinen, sillä MO-B0804P-P:n kuva oli riittävän selkeä käsivaralla tehdyissä testeissä.

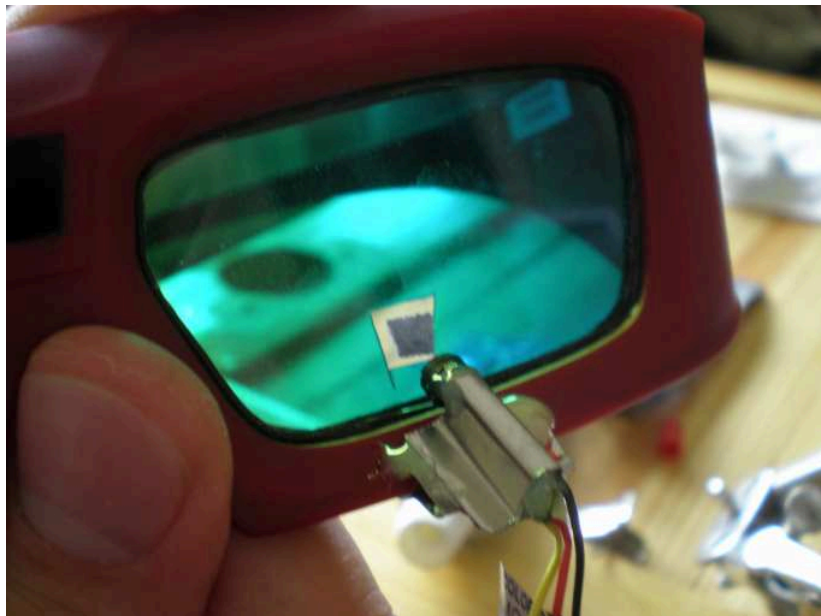
MO-B0804P-P:n sopiva asemointi piti hakea kokeilemalla. Kameran kuva oli pystyssä, kun kameran piirilevy oli "kyljellään". Kamera myös lämpeni huomattavasti. Asemoinnin testausten helpottamiseksi ja kameran tuottaman lämmön haihduttamiseksi, siihen tehtiin ohuesta metallilevystä kiinnitysalusta, joka näkyy kuvassa 4.3.

Kiinnitysalustan vastakappale asennettiin 3D-lasien alareunaan. Kahta voimakasta magneettia ja sinitarraa apuna käyttäen etsittiin kameralle sopiva paikka, johon se lukittiin epoksiliimaamalla. Paikalleen asennettu MO-B0804P-P näkyy kuvassa 4.6.



Kuva 4.6: MO-B0804P-P asennettuna 3D-lasien kehykseen.

Seuraavaksi piti tehdä läpäisy 3D-lasien suodatinkalvoihin. Laseissa on polarisaatio-suodatinkalvo lasin molemmin puolin. Aukkojen leikkaamiseksi oikeaan kohtaan ja oikean kokoiseksi käytettiin sinitarramaskia, joka näkyy kuvassa 4.7. Kalvoon leikattiin reikä sinitarramaskin reunaa pitkin mattoveitsellä viiltäen. Suodatinkalvojen tarraliiman jäämät puhdistettiin asetonilla, jonka soveltuvuus tarkoitukseen testattiin rikkiäisillä 3D-laseilla.



Kuva 4.7: Suodatinkalvoon tarvittavan aukon määrittämiseen käytetty sinitarramaski etummaisessa suodatinkalvossa. Taaemmassa kalvossa on jo aukko. Sinitarraa levitettiin kalvolle niin, että tietokoneella näkyvä kameran videokuva peittyi reunoja myöden.

Kuvassa 4.8 on MO-B0804P-P kameralla varustettu toinen versio 3D-katseenseurantalaseista valmis ensimmäisiä testejä varten. Testeissä kameran kuvan laatu osoittautui riittämättömäksi pimeässä.



Kuva 4.8: Toinen versio katseenseurantalaseista valmiina ensimmäisiin testeihin.

Aikaisemmasta viisastuneena modifioitua MO-T2706YC-P kameraa ymmärrettiin testata varsinaisissa käyttöolosuhteissa. Kamera osoittautui sopivaksi ja samoissa testauksissa 3D-lasien polarisaatiosuotimien leikkaaminen osoittautui turhaksi. Toisin kuin näkyvä valo infrapuna läpäisee polarisaatiokalvot lähes häviöittä.

Hävikin vähentämiseksi 3D-laseina käytettiin kuvan 4.5 laseja. Laseista irrotettiin vanha kamera, mutta kehyksiin jäi kolo ja linssin polarisaatiosuotimiin aukot. Ne eivät kuitenkaan haitanneet uuden kokoonpanon toimintaa, sillä uusi kamera oli tarkoitus asentaa kuvaamaan polarisaatiosuotimiin teytyjen aukkojen yli ja käyttäjän näkökulmasta polarisaatiosuotimien aukot jäivät joka tapauksessa kameran peittämän alueen eteen.

Kameran kiinnittämiseksi taiteltiin isosta paperiliittimestä runko. 3D-lasien alareunaan porattiin halkaisijaltaan millimetrin reiät, joihin runko upotettiin ja liimattiin. Modifioitua MO-T2706YC-P kamerassa oli kiinnitystä varten hienolla M6x0,5mm kierteellä varustettu kaula. Kierteeseen sopivaa mutteria etsittiin kellosepiltä ja elektroniikkaliikkeistä tuloksetta. Myöskään internetistä sopivaa mutteria ei löytynyt tilattavaksi. Koska mutterin tilaaminen esimerkiksi Würthiltä olisi ollut kohtuuttoman kallista, päätettiin kamera liimata runkoon epoksiliimalla. Kuvassa 4.9 näkyy kamera liimattuna kehykseen istutettuun runkoon.



Kuva 4.9: Katseenseurantakameraksi valittu MO-T8706LC-P01 liimattuna epoksiliimalla isosta paperiliittimestä taiteltuun runkoon. 3D-lasien kehyksessä näkyy aikaisemman asennuksen jäljiltä kameran asennusta varten tehty kolo ja suodatinkalvoihin leikatut aukot.

Metallilangasta tehdyn rungon etuna oli säädettävyys. Kameran asennuksen jälkeen sen asentoa oli mahdollista hieman kääntää. Itse konstruktio oli hyvin tukeva, mutta pienikin säätövara teki kameran asennuksesta huomattavasti vaivattomampaa.

4.4 Videonkaappaus

Koska videokuvan laatu tiedettiin katseenseurannassa tärkeäksi, haluttiin järjestelmään videon kaappausta varten laadukas videokortti. Toiveena oli, että videota voisi editoida reaaliajassa kaappauksen jälkeen ennen sen syöttämistä katseenseurantaohjelmalle. Ajateltiin, että muun muassa videokuvan kontrastia ja kirkkautta säätämällä ja kuvaa rajamalla saataisiin merkittävästi parempilaatuista videokuva katseenseurantaohjelmalle.

Ensimmäinen testattu videokortti oli Black Magic Intensity Pro [73]. Se toimii sekä Linux että Windows käyttöjärjestelmillä ja sillä pystyy monipuolisesti editoimaan videota. Pian kortin asennuksen jälkeen huomattiin, ettei Intensity Pro tue projektissa käytettäviä matalaresoluutioisia kameroita. Asia varmistettiin asiakaspalvelusta.

Sopivan videokortin kysely ulkomaisilta toimittajilta oli hidasta ja hankalaa. Suurin osa laadukkaista videokorteista on tarkoitettu nimenomaan korkearesoluutioisen videon käsittelyyn. Suomalaisilla videoalan liikkeillä ei niin ikään ollut tarjota sopivaa videokorttia tai edes neuvoja sopivan videokortin löytämiseksi.

Sopivan videokortin etsinnän aikana päätettiin testata kollegan kotoa löytyvän Ellion HMR-600H [74] mediataallentimen liittämistä Intensity Pro videokortin ja kameran väliin. Mediataallentimessa oli kameran kanssa yhteensopiva sisäänmeno ja Intensity Pro:n

kanssa yhteensopiva ulostulo.

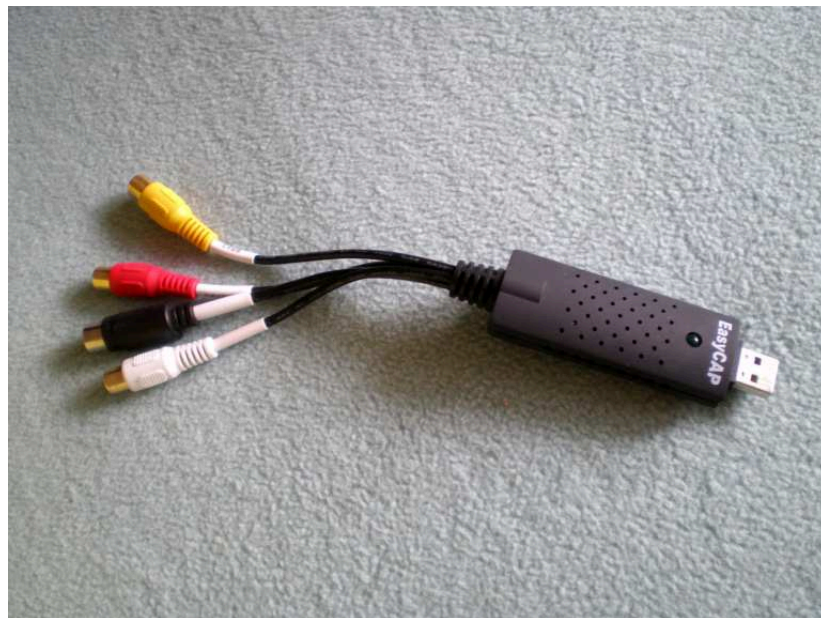
Mediatallentimen käyttäminen sovittimena osoittautui toimivaksi ratkaisuksi. Mediatallennin skaalasi kameran kuvan korkearesoluutioiseksi ja näin Intensity Pro pystyi kaappaamaan videota. Mediatallennin kuitenkin toi videoon jopa parin sekunnin viiveen, joka teki kokoonpanosta soveltumattoman katseenseurantaan.

Koska laadukkaiden videokorttien etsintä takelteli edelleen, päätettiin testata miten yksinkertainen ja halpa USB-videonkaappari toimisi. USB-videokaapparilla videokuvaa ei voisi editoida ja latenssin oletettiin olevan liian suuri katseenseurantaan.

Testattavaksi otettiin kollegalta löytynyt hyvin halpa Deal Extremestä ostettu EasyCap-merkkinen USB-videokaappari [75]. Kaappari osoittautui erittäin hyväksi. Sen latenssi oli hyvin pieni, tuskin silmällä havaittavissa verrattuna aiempaa mediatallentimen sekuntiluokan viiveeseen. Kuvan laatu oli hyvä ja kaappari toimi ilman ongelmia katseenseurantaohjelman kanssa.

Myöhemmin kokeiltiin myös EasyCap-kaapparia kalliimpaa ja korkealaatuisempaa Terratec G1 -merkkistä USB-videokaapparia [72]. Terratec G1:n latenssi oli kuitenkin huomattavasti EasyCap-kaapparia suurempi, joten sen käytöstä päätettiin luopua.

Projektin loppuun asti käytettiin hyväksi havaittua kuvassa 4.10 näkyvää EasyCap-kaapparia [75]. EasyCap-kaapparin käytössä havaittiin ainoastaan yksi huomionarvoinen asia. Jos kaapparin irrottaa kesken käytön tietokoneesta niin Windows 7 käyttöjärjestelmä kaatuu ja kone sammuu välittömästi.



Kuva 4.10: Tietokoneen USB-väylään kiinnitettävä EasyCap-videokaappari.

4.5 Infrapunaledien valinta

Hyvä infrapunavalaistus on tärkeä katseenseurantakameran kuvan laadun kannalta, sillä 3D-katseenseurantalaseja käytettäessä silmä on lähes pimeässä. Varhaisessa vaiheessa huomattiin myös se, että riittävän hyvälaatuisen videon saamiseksi kamerat vaativat silmään kohdistettavaksi suhteellisen paljon infrapunasäteilyä. Käytettävien infrapunaledien tuli siis olla tehokkaita.

Infrapunaledit haluttiin siististi piiloon kehyksen sisään, joten niiden tuli olla pieniä. Ledien kiinnittäminen 3D-lasien linssin kehykseen vaikutti tarkoitukseen sopivalta vaihtoehdolta. Koska 3D-lasien näkyvää valoa heikosti läpäisevien linssien ei tiedetty läpäisevän infrapunavaloa lähes esteettä ja ledit haluttiin siististi piiloon, ne päätettiin asentaa 3D-lasien kehyksen sisäpuolelle. Mahtuakseen kehyksen ja kasvojen väliin, ledien piti siis olla pieniä.

Ensimmäiseksi kokeiltiin pieniä Osramin SFH4050-Z [76] ledejä. Niitä oli tarkoitus juottaa kolme sarjaan monisäikeisestä sähköjohdosta purettuun säikeeseen. Juottaminen osoittautui haasteelliseksi, koska ledi oli vain 0,8 millimetriä leveä ja 1,7 millimetriä pitkä.

Kun SFH4050-Z ledit oli saatu juotettua sarjaan ja niitä testattiin, juotokset irtosivat. Ledit kuumenivat niin paljon, että juotostina suli. SFH4050-Z ledien käsittely oli niin hankalaa, että päätettiin kokeilla suurempia ledejä.

Seuraavaksi testattiin Osramin SFH4252 [77] ledejä. Nämä ledit olivat suhteellisen helppoja juottaa, sillä ledin pituus oli 3,4 millimetriä ja leveys 3,0 millimetriä. Ledejä juotettiin kolme sarjaan testiä varten.

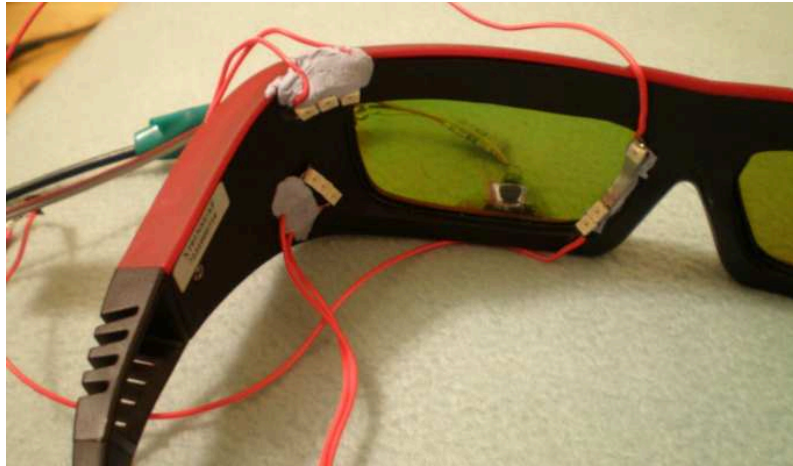
SFH4252 osoittautui kuitenkin liian kapeakulmaiseksi. 60 asteen keila ei ollut riittävän suuri ledien ollessa 3D-lasien kehyksen sisäpuolella. Videokuvaan syntyi epätasainen valaistus, jossa suoraan ledien edessä oleva alue ylivalottui. Vastaavaa lediä päätettiin etsiä suuremmalla valokeilalla.

SFH4252 muistuttava Optekin OP280 [78] osoittautui toimivaksi malliksi. Sen spesifikaatiossa ilmoitettu valokeilan kulma oli peräti 200 astetta ja teho kuitenkin riittävän suuri.

4.6 Infrapunaledien asennus

Aluksi ledejä testattiin käsivaralla. Kolmen kappaletta sarjaan juotettuja ledejä vietiin johdosta kiinni pitäen 3D-lasien ja kasvojen ja silmän väliin. Kääntelemällä ja liikuttelemalla lediryhmää voitiin videokuvasta katsomalla arvioida mihin ledit olisi sopivinta asentaa.

Kun sopivat paikat lediryhmille oli suunnilleen tiedossa, ne kiinnitettiin sinitarralla. Näin lediryhmien paikkaa voitiin määrittää tarkemmin. Kuvassa 4.11 näkyy testivalaistuksen kokoonpano.

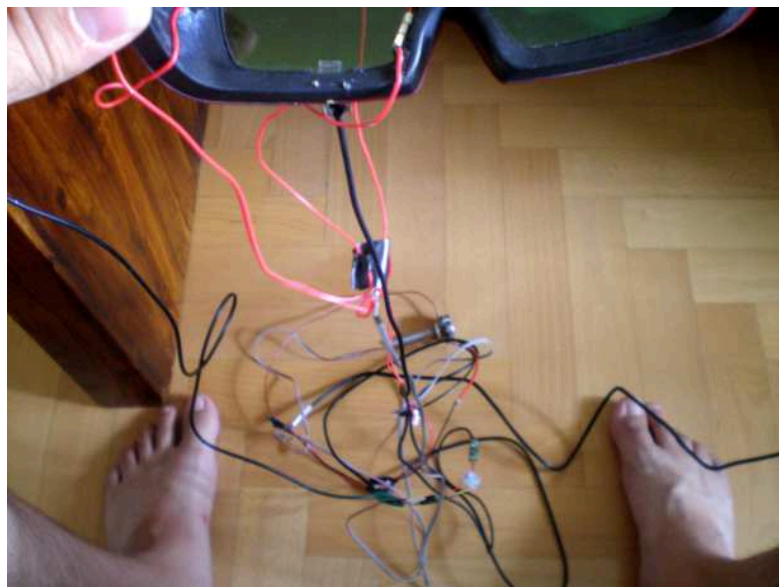


Kuva 4.11: Lediryhmät on kiinnitetty 3D-lasien kehyksen sisäpuolelle testausta varten sinitaralla.

Myöhemmin havaittiin, että kaksi lediryhmää riitti tasaisen valaistuksen aikaansaamiseksi. Toinen lediryhmä oli ohimon puolella ja toinen nenän varren kohdalla. Lediryhmät kiinnitettiin pysyvästi syanoakrylaattipohjaisella pikaliimalla.

4.7 Viimeistely

Kun lopulliset komponentit oli asennettu, infrapunaledille tulevat johdot yhdessä kameran virta ja videokaapelin kanssa piti siistiä. Vaikka kokoonpano oli varsin yksinkertainen, niin johdotusta piti tehdä jonkin verran. Kuvassa 4.12 näkyy johdotuksen sotkuisuus ennen viimeistelyn aloittamista.



Kuva 4.12: Vaikka kokoonpano oli yksinkertainen, johdotuksesta tuli kehitystyön edetessä varsin sotkuinen.

3D-katseenseurantalaseihin kiinteästi kuuluvasta johdosta haluttiin siisti ja lyhyt. Videoliittymää varten 3D-katseenseurantalasien videokaapeliin juotettiin komposiittivideoliitin. Näin USB-videokaapparin ja 3D-katseenseurantalasien väliin voi laittaa tarvittavan mittaisen videokaapelin.

Virta valaistukselle ja kameralle otettiin tietokoneen USB-liittimestä. Virtajohdon jatkokappaleeksi ei kuitenkaan ollut käytettävissä USB-liittimiä, joten jatkomahdollisuus toteutettiin ruuviliittimin. Kuvassa 4.13 näkyy koko laitteisto viimeisteltynä.



Kuva 4.13: Valmis laitteisto. 3D-katseenseurantalasien johto jätettiin lyhyeksi. Oikeassa reunassa on virran ottoon USB-liittimestä tarkoitettu kaapeli.

Lopuksi johtoihin ja kameras rungon ympärille kierrettiin mustaa eristysteippiä. Tarkoituksena oli paketoita johdot siistiin nippuun ja estää mahdollisia heijastuksia, jotka saattaisivat häiritä pään paikannukseen käytettävää optista paikannusjärjestelmää.

4.8 Yhteenveto

3D-katseenseurantalaset rakennettiin asentamalla kamera CAVE-ympäristössä käytettävään 3D-suljinlasien kehykseen. Kameraksi valittiin Misumin [69] toimittama modifioitu MO-T2706YC-P kamera. Kameran fokus oli tuotantolinjalla säädetty niin, että kamera voitiin asentaa lähelle silmää. Kamera asennettiin paperiliittimestä taitellun rungon (kuva 4.9) avulla kehyksen alareunaan. Kehyksen sisäpuolelle asennettiin kaksi kolmen Optekin OP280 [78] infrapunaLEDin ryhmää. LEDit ja kamera saivat virran tietokoneen USB-liittimen kautta. Lopuksi kameras runko peitettiin ja johdot niputettiin eristysteipillä. Kameran video kaapattiin EasyCap-merkkisellä [75] USB-videokaapparilla (kuva 4.10). Valmis laitteisto näkyy kuvassa 4.13.

5. OHJELMISTO

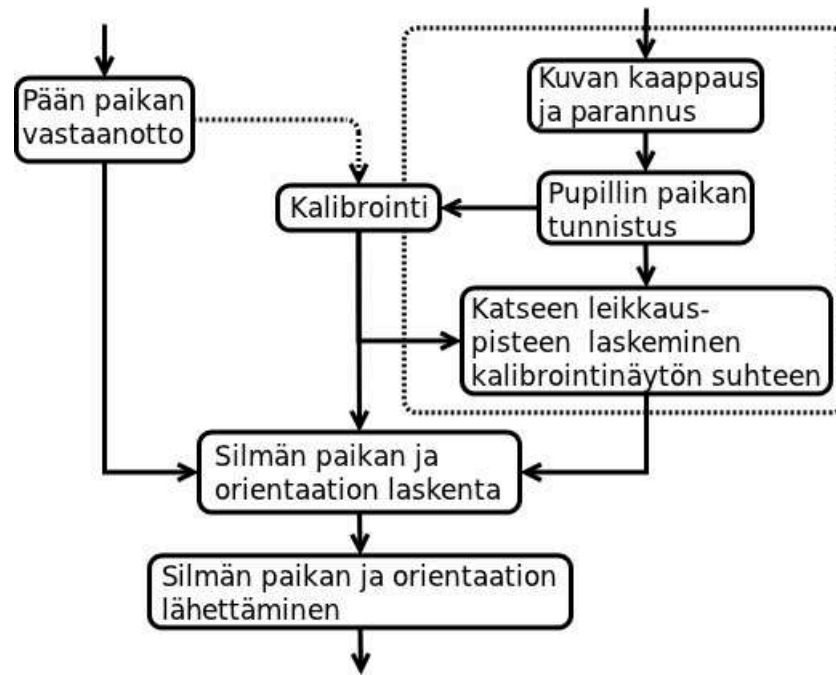
5.1 Tavoitteet

Tarkoituksena oli toteuttaa kevyt ja yksinkertainen ohjelmisto, joka laskee silmän paikan ja katseen suunnan virtuaaliympäristössä. Yhteensopivuussyistä ohjelman haluttiin käyttävän lasketun datan lähetykseen yleisesti virtuaalitekniikassa käytettyä VRPN rajapintaa. Alun perin tavoitteena oli käyttää valmista pupillin paikan videokuvasta tunnistavaa koodia osana omaa itsenäistä ohjelmaa ja toteuttaa muun muassa kalibrointi itse. Projektin edetessä tavoitteita korjattiin ja käyttöön otettiin Gaze Tracker ohjelma, joka huolehti 2D-tason pikselikoordinaattien laskennasta, eikä ohjelmistoa toteutettu yhtenä kokonaisuutena.

5.2 Ohjelmiston rakenne

Ohjelmiston rakenne oli varsin yksinkertainen ja jakaantui kahteen osaan: säteeseen perustuvaan tavanomaiseen katseenseurantaan ja tavanomaisen katseenseurannan tuloksen transformointiin virtuaaliympäristöön. Tavanomaisen pöytä- tai kannettavalla tietokoneella käytettävän katseenseurantaohjelman tehtävänä on laskea videokuvasta tunnistettavan pupillin paikan perusteella sen pikselin koordinaatit tietokoneen näytöltä, johon käyttäjä katsoo. Tämä tulos piti transformoida virtuaaliympäristöön, jossa käyttäjä voi liikkua ja käännellä päätään.

Pupillin paikan tunnistaminen videokuvasta on suhteellisen monimutkainen toteuttaa. Koska tarjolla on valmiita avoimia ja maksuttomia toteutuksia, päätettiin tämä osa lainata muualta. Tarkoitus oli lainata pupillin paikan laskeva koodi, tehdä siitä oma luokka ja paketoida koko ohjelmisto siististi yhdeksi kokonaisuudeksi. Kaaviossa 5.1 on esitettyä ensimmäinen hahmotelma ohjelmiston osista ja niiden yhteyksistä. Tavanomaisen katseenseurannan osat on ympäröity katkoviivalla.



Kaavio 5.1: Ensimmäinen hahmotelma ohjelmiston osista ja niiden yhteyksistä. Katkoviivalla ympäröity kokonaisuus käsittää tavanomaisen katseenseurannan osat.

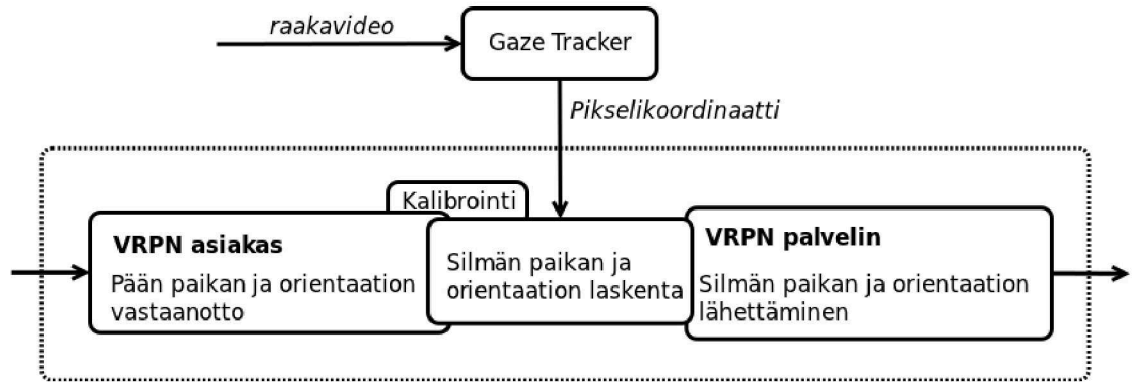
Kuvan kaappaus videosta ja pupillin paikan laskeminen kaapatusta kuvasta nähtiin koko ohjelmiston haastavimpana osana. Siksi kehitystyö aloitettiin tähän tarkoitukseen sopivan koodin etsinnällä. Omaa katseenseuranta-algoritmia ei tämän projektin puitteissa ollut tarkoitus tehdä.

Lyhyen etsinnän tuloksena löytyi avoin ja tarkoitukseen sopivalta näyttävä katseen-seuranta tekevä C-ohjelmointikielellä kirjoitettu algoritmi, OpenEyes Starburst [79, 80]. C-kielistä koodia on yleensä helppo ottaa C++ ohjelmiin mukaan.

Algoritmin kanssa oli kuitenkin ongelmia alusta pitäen. Ohjelma, josta algoritmia piti irrottaa, oli tarkoitettu IEEE-1394 web-kameralle, eli niin kutsutulle FireWire-kameralle. Pelkästään kuvan kaappausta toteuttavan koodin muokkaaminen osoittautui käytettävissä olevan ajan puitteissa mahdottomaksi.

Koska kameroita ja valaistusta piti testata katseenseurantaohjelmaa vasten, videon kaappaus ja pupillin paikan laskenta oli saatava nopeasti toimimaan. Niinpä päätettiin etsiä valmista tavanomaista työasemalle tai kannettavalle tietokoneelle tarkoitettua katseenseurantaohjelmaa. Katseenseurantaohjelma hoitaisi itsensä kalibroinnin, videon kaappauksen ja katseen osumakohdan laskemisen 2D-tason eli tietokoneen näytön suhteen.

Ainoa löytynyt helposti testattava ja luotettavan oloinen katseenseurantaohjelma oli Gaze Tracker [46]. Gaze Trackerin käyttöönotto ei merkittävästi muuttanut ohjelmiston arkkitehtuuria. Se korvasi kaaviossa 5.1 näkyvän katkoviivalla ympäröidyn osan. Uudelleen mietitty ohjelmiston rakenne näkyy kaaviossa 5.2. Kuvassa 5.3 näkyy Gaze Trackerin graafinen käyttöliittymä.



Kaavio 5.2: Ohjelmiston lopullinen rakenne. Gaze Tracker huolehtii videon kaappauksesta ja pikselikoordinaatin laskemisesta kalibrointinäytön suhteen. Katkoviivalla rajattu kokonaisuus on toteutettu ohjelmisto. Ohjelmistossa toimii VRPN asiakas ja se tarjosi silmän paikkaa ja orientaatiota VRPN paikantimena.



Kuva 5.3: Gaze Trackerin graafinen käyttöliittymä. Graafinen käyttöliittymä teki ohjelmasta helpon ottaa käyttöön, mutta se ei aina toiminut toivotulla tavalla. Käyttöliittymä unohti sammutettaessa asetuksia ja käyttäjätestauksessa käytetyn Gaze Trackerin silmän tunnistamiseen tarkoitetut valitsimet eivät toimineet.

Siinä missä Gaze Tracker helpotti valtavasti projektin edistymistä tarjoamalla valmiina kameran hallinnan, kuvan parantelun, pupillin paikannuksen ja pikselikoordinaatin laskennan, se asetti myös rajoituksia. Koska Gaze Tracker ei tarjonnut ohjelmointirajapintaa, joten toteutettavaa ohjelmistoa ei voinut paketoita yhdeksi kokonaisuudeksi. Tämän ei johtanut ainoastaan kahden erillisen ohjelmiston käyttöön, vaan myös kahteen erilliseen kalibrointiin.

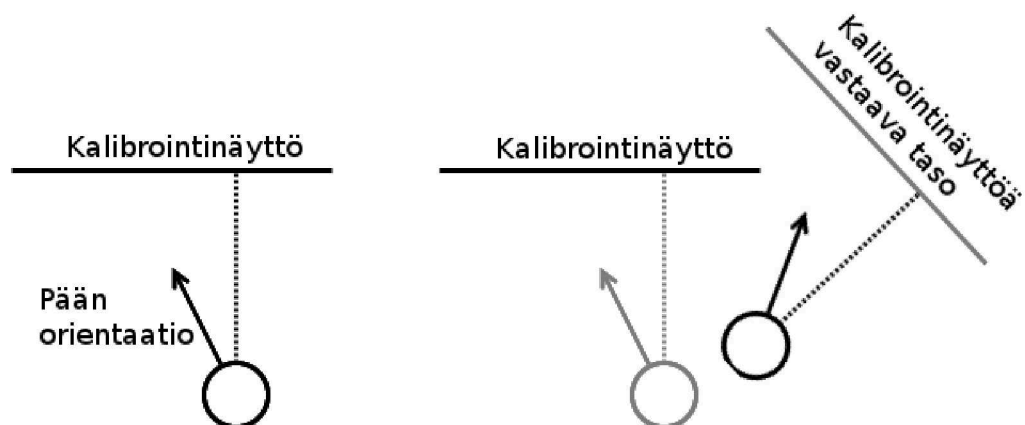
Tarkoitukseen sopivaa katseenseurantaohjelmaa etsittäessä törmättiin muutamaani eri vaihtoehtoon, kuten Opengazer [81] ja TrackEye [82] -ohjelmiin. Molemmat olivat kuitenkin kuolleita projekteja, joita ei ollut kehitetty vuosiin.

Koska Gaze Tracker osoittautui helpoksi asentaa ja käyttää ja se toimi käsivaralla tavallisen web-kameran kanssa tehdyssä testissä, se päätettiin pitää ensimmäisenä vaihtoehtona. Muita ohjelmia ei myöhemmin etsitty tai testattu, koska Gaze Tracker toimi tyydyttävästi projektin loppuun asti.

5.3 Ohjelman toimintaperiaate

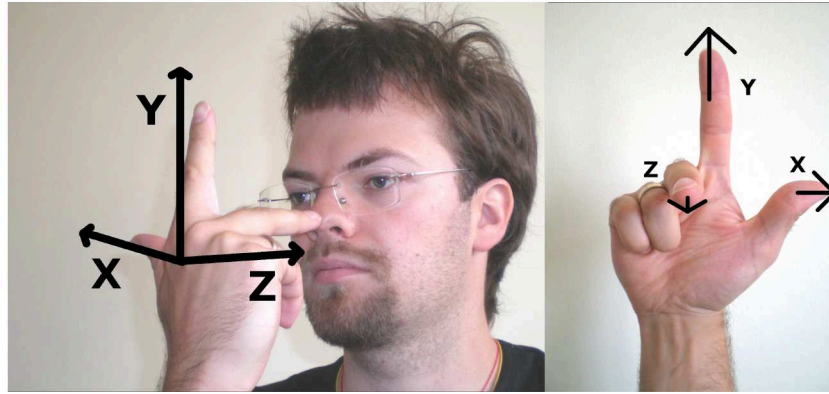
Koska käyttäjän silmä on käyttäjän päässä kiinni ohjelman piti ensimmäisenä vastaanottaa pään paikka ja orientaatio. Ohjelmiston käynnistysvaiheessa syötetty korjausvektori kertoi ohjelmalle missä kohdassa silmä on pään suhteen. Silmän paikka laskettiin summaamalla pään paikkavektoriin pään orientaatiolla transformoitu silmän paikan korjausvektori.

Silmän orientaation laskeminen oli monimutkaisempaa. Gaze Trackerilta saatiin katseen osumakohdan pikselikoordinaatit sen tason suhteen, joka vastasi Gaze Trackerin kalibroitiin käytettyä näyttöä kalibroinnin aikana. Tätä tasosta käytetään myöhemmin nimeä "kalibrointinäyttöä vastaava taso". Gaze Trackerin kalibroinnin aikana käyttäjän piti pitää päätään paikallaan, mutta kalibroinnin jälkeen käyttäjä saattoi liikuttaa päätään mielivaltaisesti. Kalibroinnin jälkeen kalibrointinäyttöä vastaava taso, jonka suhteen Gaze Tracker tulosti pikselikoordinaatteja, jäi ikään kuin leijumaan käyttäjän pään eteen kalibroinnin aikaiseen asemaan. Tätä havainnollistetaan kuvassa 5.4. Silmän kalibroinnin aikainen paikka, kohtisuora etäisyys kalibrointinäyttöön ja pään orientaatio piti siis tallentaa myöhempää laskentaa varten.



Kuva 5.4: Gaze Tracker antaa pikselikoordinaatteja kalibrointinäytön suhteen niin kauan kalibroinnin jälkeen, kun pää ei liiku. Kun päätä liikutetaan, kalibrointinäyttöä vastaava taso seuraa pään mukana. Gaze Tracker antaa pikselikoordinaatteja tämän tason suhteen. Vasemmanpuoleinen kuva edustaa kalibrointitilannetta. Oikeanpuoleinen kuva edustaa tilannetta käytön aikana. Pään alkupaikka ja orientaatio näkyy harmaalla. Pää on liikkunut ja kääntynyt ja kalibrointinäyttöä vastaava taso on siirtynyt samassa suhteessa.

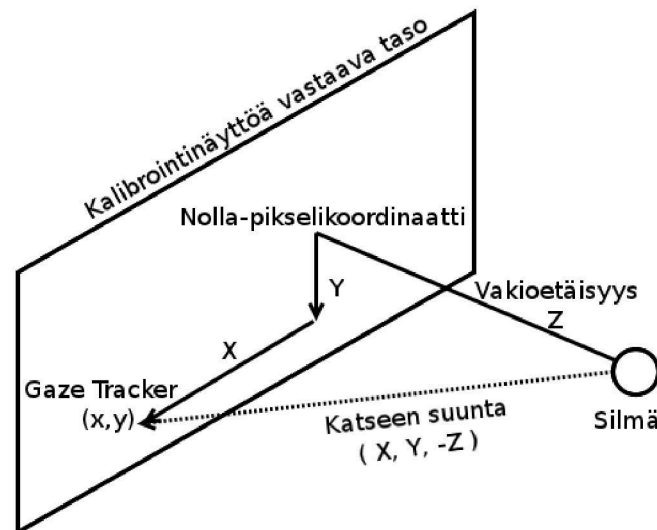
Kalibrointinäytön mitat, paikka maailman koordinaatistossa ja resoluutio syötettiin ohjelmalle käynnistysparametreina. Kalibrointinäytön oletettiin olevan maailman koordinaatistossa x-y-tasolla etupuoli positiivisen z-akselin suuntaan. Ohjelmassa käytetty oikean käden koordinaatisto on esitetty käyttäjän suhteen kuvaassa 5.5.



Kuva 5.5: Ohjelmassa käytetty oikean käden koordinaatisto käyttäjän suhteen. Akselien suuntien kanssa on oltava tarkkana, sillä ei ole olemassa yhtä oikeaa järjestystä.

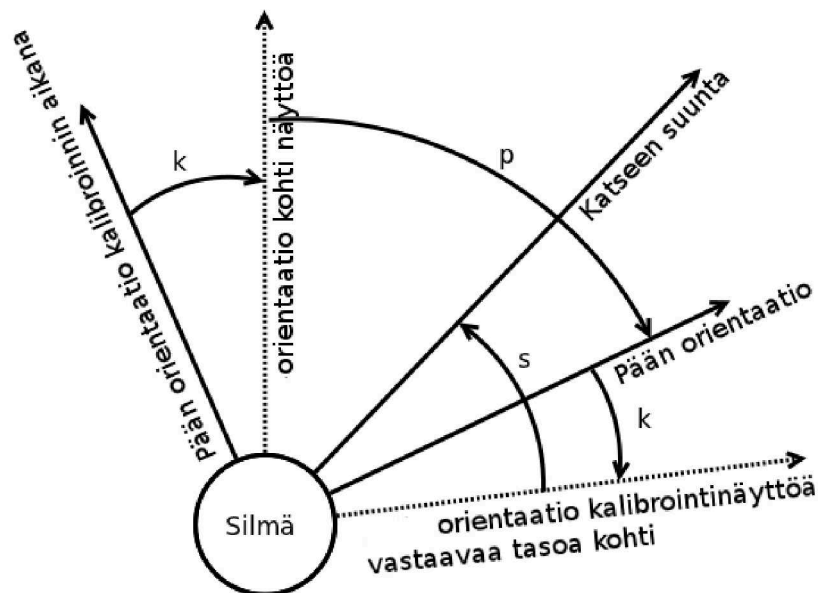
Kalibroinnin aikana laskettiin ja tallennettiin silmän paikan nolla-pikselikoordinaatit. Nämä saatiin silmän paikan projektiona kalibroitinäytölle. Käytännössä nolla-pikselikoordinaatit kertoivat mitä näytön pikseliä kohden silmä oli kohtisuorassa kalibroinnin aikana ja mitä kalibroitinäyttöä vastaavaa tasoa kohden silmä on kohtisuorassa käytön aikana. Laskennassa huomioitiin näytön paikka maailman origon suhteen, näytön resoluutio ja koko.

Hyödyntämällä nolla-pikselikoordinaattia voitiin laskea silmän orientaation muutos kohtisuoraan orientaatioon nähden Gaze Trackerilta saatujen pikselikoordinaattien perusteella. Pikselipoikkeama kerrottiin vaakasuunnassa pikselin leveydellä metreinä ja pystysuunnassa pikselin korkeudella. Tilannetta havainnollistaa kuva 5.6. Orientaation muutoksen laskennassa käytettiin valmista funktiota, joka laski orientaation muutoksen kahden vektorin välillä. Tuloksena saatiin katseen suunnan poikkeama pään koordinaatistossa.



Kuva 5.6: Kalibroitinäyttöä vastaavaa tasoa kohtisuorassa olevan suoran (Vakioetäisyys Z) ja katseen suuntavektorin (katkoviiva) välinen poikkeama on katseen poikkeama pään suhteen. Katseen suuntavektorin x ja y arvot saadaan kertomalla Gaze Trackerin antaman pikselikoordinaattien ja nolla-pikselikoordinaattien erotus pikselin leveydellä/korkeudella metreinä. Vektorin z -komponentti on vakioetäisyyden z vastaluku.

Lopullinen katseen suunta eli silmän orientaatio laskettiin kalibroinnin aikana tallennetusta pään orientaatiosta, pään nykyisestä orientaatiosta ja katseen suunnan poikkeamasta pään suhteen. Kuva 5.7 havainnollistaa tilannetta. Pään nykyistä orientaatiota transformoitiin ensin kalibroinnin aikaisen pään orientaation ja kalibroitinäyttöä vasten kohtisuorassa olevan miinus z-akselin välisellä poikkeamalla. Näin saatu tulos oli orientaatio maailman koordinaatistossa kohti kalibroitinäyttöä vastaavaa tasoa. Tätä tulosta transformoitiin edelleen katseen orientaatiolla pään suhteen. Näin saatiin silmän orientaatio eli katseen suunta maailman koordinaatistossa. Ohjelmisto asetettiin laskemaan tuloksia 50 kertaa sekunnissa.



Kuva 5.7: Tässä on yksinkertaistettu 2D-havainnollistus katseen suunnan laskemisesta maailman koordinaatistossa. *K* on korjaus kalibroinnin aikaisesta pään orientaatiosta orientaatioon kohti kalibroitinäyttöä. *P* on pään orientaatio maailman koordinaatistossa. *S* on silmän orientaatio pään suhteen. Silmästä piirretty suora kalibroitinäyttöä vastaavaa tasoa kohti leikkaa nolla-pikselikoordinaatin ja katseen suunta pään suhteen lasketaan tämän orientaation suhteen. Orientaatiosta kohti kalibroitinäyttöä, päästään *p*, *k* ja *s* kaaria pitkin katseen suuntaan maailman koordinaatistossa.

5.4 Testaus

Ohjelmiston testauksen tavoitteena oli löytää ja korjata virheet mahdollisimman varhaisessa kehitysvaiheessa. Koska ohjelmiston kehitys tapahtui eri paikassa kuin sen varsinainen käyttö ja testaus aidossa ympäristössä vaati laboratoriohenkilökunnan työpanosta, tavoitteena oli testata manuaalisesti ja apuohjelmien ohjelmiston toiminta ennen integraatiovaihetta. Integraatiovaiheessa järjestelmää testattiin apuohjelmien tukemana kokeilemalla

järjestelmän aitoa käyttöä. Tämä menetelmä oli erityisen tehokas siksi, että ohjelman oikea toiminta oli nähtävissä ja ymmärrettävissä sen perusteella, että katseen osumakohta osui oikeaan kohtaan virtuaaliympäristössä.

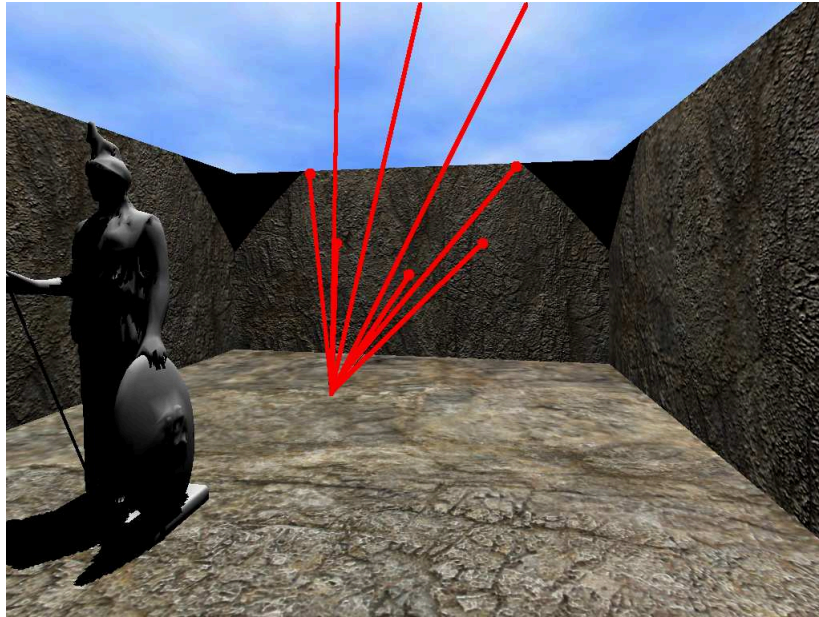
Ohjelma sisälsi varsin monimutkaista laskentaa. Laskennan tulokset oli myös tarkoitettu visualisoitavaksi virtuaaliympäristöön, joten niistä ei siis numeroina helposti nähnyt olivatko ne oikein vai väärin. Koska integraatiotestaukseen tiedettiin olevan aikaa hyvin vähän, piti ohjelmaa testata mahdollisemman huolellisesti kehitystyön aikana.

Ensimmäinen tarvittu testaukseen tarkoitettu ohjelma oli VRPN paikannin, joka imitoi pään paikanninta. Tämä ohjelma lähetti haluttua pään paikkaa ja orientaatiota testausta varten. Tämän ohjelman oli aikaisempaa tarvetta varten toteuttanut Joonatan Kuosa ja sitä käytettiin uudelleen tämän ohjelman testauksessa.

Toinen toteutettu testiohjelma oli Gaze Trackeria imitoinut ohjelma, Fake Gaze Tracker. Fake Gaze Trackerille saattoi antaa syötteeksi tiedoston. Tiedostossa oli joka rivillä kesto sekunteina, pikselikoordinaatti jota Fake Gaze Trackerin tuli lähettää sekä intervalli. Intervalli kertoi kuinka pitkän ajan välein pikselikoordinaatteja lähetettiin. Kesto kertoi kyseisellä rivillä olevien pikselikoordinaattien lähetyksen kokonaiskeston.

Ohjelman kehityksen aikana ohjelmistoa testattiin yksittäisillä arvoilla. Muuttamalla yhtä parametria, esimerkiksi Fake Gaze Trackerin ohjelmalle syöttämää pikselikoordinaattia, kerrallaan pyrittiin poissulkemaan mahdolliset virheet laskennassa. Tällainen käsin testaaminen oli kuitenkin työlästä. Merkittävän ongelman asetti laskennan tulosten kompleksisuus. Tuloksena saatiin silmän orientaatio quaternionina. Quaternioni on orientaation matemaattinen esitystapa, joka on yleisesti käytössä VRPN:n kanssa. Quaternion tulkinta sellaisenaan oli mahdotonta, joten se muunnettiin Eulerin kulmiksi. Näiden kulmien kanssa tuloksen ymmärtäminen oli mahdollista mutta vaati keskittymistä.

Fake Gaze Tracker mahdollisti laskennan testauksen visualisointiin perustuen. Kun ohjelman tulokset käsin testauksessa olivat oikein, se lähetettiin testattavaksi oikean virtuaaliympäristön kanssa. Kuvassa 5.8 on erään testauksen tulos. Silmän paikka on asetettu kivilattialle tietylle etäisyydelle vastapäisestä seinästä ja Fake Gaze Tracker syöttää ennalta laskettuja pikselikoordinaatteja, jotka muodostavat ympyrän. Kuvasta näkyy, että ohjelma toimii tässä tilanteessa odotetusti. Katseen suunta pyörii ympyrää.



Kuva 5.8: Ohjelman testausta virtuaaliympäristössä. Haluttu pään paikka ja orientaatio on syötetty niitä imitoivalle VRPN palvelimelle. Fake Gaze Tracker lähetti haluttuja pikselikoordinaatteja. Katseen suuntaa havainnollistavat säteet muodostavat säännöllisen kartion haluttuun suuntaan, josta on helppo päätellä, että ohjelma laskee tässä tapauksessa tulokset oikein. Säteitä ja osumakohtia on vahvistettu kuvankäsittelyohjelmassa kuvan selkeyttämiseksi.

Ohjelmiston integraatiotestaukseen oli aikaa vain vähän. Integraatiotestaus suoritettiin käyttäjätestausta edeltävänä päivänä ja se sujui varsin hyvin. Järjestelmässä huomattiin kuitenkin olevan jotain vikaa. Tulokset eivät aina vastanneet todellisuutta. Tarkkaa syytä virheelliselle toiminnalle ei pystytty selvittämään käytettävissä olleen ajan puitteissa. Koska katseenseuranta suorittavaa ohjelmaa oli testattu onnistuneesti, oletuksena oli että ongelma saattaisi olla virtuaaliympäristöä visualisoivassa ohjelmassa katseen suuntaa kuvaavan säteen piirtämisessä. Koska laskentavirheen vaikutus tuloksiin oli varsin pieni käyttäjätestauksen ajaksi testikäyttäjälle tarkoitetulla paikalla, käyttäjätestausta päätettiin toteuttaa suunnitelmien mukaisesti.

5.5 Yhteenveto

Ohjelmiston peruseriaate mukaili [59, 65] toteuttamia ratkaisuja. Gaze Tracker kaappasi videon, tunnisti pupillin paikan ja laski suhteelliset pikselikoordinaatit kalibrointinäyttöä vastaavan 2D-tason suhteen. Toteutettu ohjelmisto huolehti kalibroinnin aikaisten vakioarvojen tallentamisesta Gaze Trackerin 2D-tason sitomiseksi pään koordinaatistoon. Näin toteutettu ohjelmisto pystyi laskemaan VRPN rajapinnan yli saadun pään paikan ja orientaation ja Gaze Trackerin tarjoaman pään koordinaatistoon sidotun kalibrointinäyttöä vastaavan tason pikselikoordinaattien avulla silmän paikan ja orientaation virtuaaliympäristössä. Toteutettu ohjelmisto tarjosi silmän paikkaa ja orientaatiota VRPN paikantimena

lähes reaaliajassa. Virtuaaliympäristön visualisoinnista vastannut Hydra tallensi vastaanotti ja tallensi dataa myöhempää visualisointia varten. Hydra pystyi myös näyttämään katseen osumakohtaa virtuaaliympäristössä punaisena pallona sitä mukaan kun uusia arvoja oli tarjolla VRPN rajapinnan yli.

Gaze Trackerin käyttö aiheutti sen, että ohjelmistoa ei saatu paketoitua yhdeksi ajettavaksi tiedostoksi. Tämä heikensi selvästi ohjelmiston käyttömukavuutta. Yhden ohjelman käynnistäminen ja kalibrointi on mielekkäämpää kuin kahden ohjelman käynnistäminen ja molempien kalibrointi. Vaikka toteutettu ohjelmisto kalibrooi itsensä automaattisesti Gaze Trackerin kalibroinnin yhteydessä, se oletti pään paikan ja orientaation pysyvän vakiona. Gaze Trackeria ei haluttu muokata, eikä sen kalibrointi hyväksy pään liikkeitä. Tässä työssä toteutetussa ohjelmassa tai katseenseurannan tuloksia visualisoivassa ohjelmassa oli myös tuntematon tuloksia vääristävä virhe, jota ei ehditty paikantaa. Virheen vaikutus ei kuitenkaan ollut niin merkittävä, että se olisi estänyt käyttäjätestauksen.

Kaiken kaikkiaan ohjelmiston kehitys onnistui hyvin, huomioiden se, että varsinaista testausta aidossa käyttöympäristössä voitiin kehitystyön aikana toteuttamaan vain vähän. Toteutettu ohjelmiston prototyyppi on toimiva ja helposti laajennettavissa ja kehitettävissä eteenpäin.

6. KÄYTTÄJÄTESTAUS

6.1 Tavoitteet

Käyttäjätestauksen tavoitteena oli todeta toteutetun järjestelmän toimivuus ja saada karkea arvio sen tarkkuudesta ja jatkokehitystarpeesta todellisiin tarkoituksiin soveltuvaksi. Testauksessa tarkasteltiin järjestelmää laaja-alaisesti. Käytettävyyden kannalta tärkeitä elementtejä ovat käyttökelpoisuus, käytön helppous, käytön miellyttävyys ja opittavuus [66]. Tarkasteluun haluttiin siis

- seurannan tarkkuus,
- seurannan latenssi,
- järjestelmän toimintavarmuus sekä
- järjestelmän helppokäyttöisyys ja käyttömukavuus.

Järjestelmän tarkkuus ja latenssi ovat merkittäviä käyttökelpoisuuden kannalta. Jos katseen osumakohta ei osu riittävällä tarkkuudella sinne minne käyttäjä katsoo, järjestelmä on käyttökelvoton. Riittävä tarkkuus määräytyy käyttötarkoituksen mukaan. Järjestelmän toimintavarmuus liittyy sekä käytön helppouteen ja miellyttävyyteen tutkimushenkilökunnan kannalta että käyttökelpoisuuteen. Toimintavarma järjestelmä edesauttaa sujuvaa ja miellyttävää käyttöä. Opittavuutta ei tässä tutkimuksessa tarkasteltu.

Järjestelmän tarkkuuden osalta tavoitteena oli selvittää visuaalisesti paljonko seurannan tulos keskimäärin poikkeaa todellisesta katseen suunnasta ja paljonko tuloksissa on hajontaa. Visuaalisella selvittämisellä tarkoitetaan ulkoisen ja sisäisen tarkkuuden arviointia kuvista, joissa katseen osumakohdat näkyvät. Lisäksi haluttiin silmämääräisesti arvioida järjestelmän latenssia toisin sanoen sitä, miten suurella viiveellä katseenseurannan tulos syntyy. Järjestelmän tarkkuuden oletettiin olevan esittelytarkoituksiin riittävä.

Koska 3D-katseenseurantalasien valuminen nenällä havaittiin merkittäväksi potentiaaliseksi virhelähteeksi, päätettiin testauksen aikana tallennettavasta datasta tehdä vertailua ajan suhteen. Noin minuutin mittaisesta jaksosta jokaisen testihenkilön dataa päätettiin ottaa kaksi kymmenen sekunnin jaksoa alusta ja lopusta ja tarkastella, paljonko kasat siirtyvät testin aikana. Oletuksena oli että lyhyenkin testirupeaman aikana virhettä kertyisi huomattavasti.

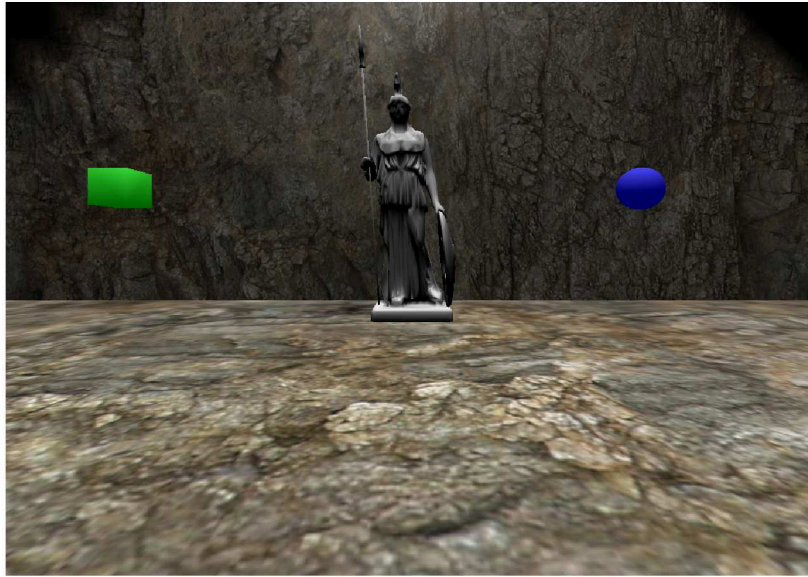
Järjestelmän toimintavarmuuden osalta haluttiin selvittää, toimiiko järjestelmä eri käyttäjillä samalla tavalla. Yhtä lailla haluttiin selvittää tekeekö järjestelmä omituisia tai odottamattomia asioita. Odotettavissa oli, että järjestelmä voisi toimia eri tavalla eri käyttäjillä johtuen muun muassa 3D-lasien asettumisesta eri kohtaan silmien suhteen. Tavoitteena oli tunnistaa merkittävimmät toimintavarmuutta heikentävät seikat.

Järjestelmän käyttömukavuutta ja helppoutta haluttiin tarkastella sekä testikäyttäjän että järjestelmää käyttävien testaajien suhteen. Testaajien tehtävänä on käynnistää ja kalibroida ohjelmat ja heidän voidaan olettaa olevan tekniikan alan ammattilaisia. Järjestelmän prototyypin käyttäjien voidaan olettaa olevan pääasiassa yritysveraita, joille järjestelmää esitellään. Testikäyttäjän kannalta kiinnostavaa oli kalibroinnin helppous ja mukavuus ja 3D-katseenseurantalasien käyttömukavuus. Testaajien kannalta haluttiin selvittää jokaiseen kalibrointiin, testaukseen ja datan analysointiin vaadittavien vaiheiden monimutkaisuutta. Oletuksena oli, että järjestelmän käyttö on monimutkaista ja vaatii merkittävää yksinkertaistusta, sillä ohjelmistoa ei toteutettu yhtenä kokonaisuutena. Eri ohjelmien käynnistäminen sekä Hydran puolelta että tässä työssä toteutetun ohjelmiston osalta havaittiin monimutkaiseksi. Testikäyttäjien odotettiin pitävän 3D-katseenseurantalaseja kömpelöinä ja kalibrointia haasteellisena, koska päätä pitää pitää paikoillaan ilman tukea.

Testauksen tavoitteiden kautta pyrittiin luomaan runko, jonka pohjalta toteutettu testaus tukisi tehokkaasti niiden vikojen ja puutteiden löytymistä, joiden korjaaminen tekisi järjestelmästä mahdollisimman käytettävän järjestelmän esittelyä silmällä pitäen. Onnistumisten ja positiivisten ominaisuuksien etsiminen oli toissijaista.

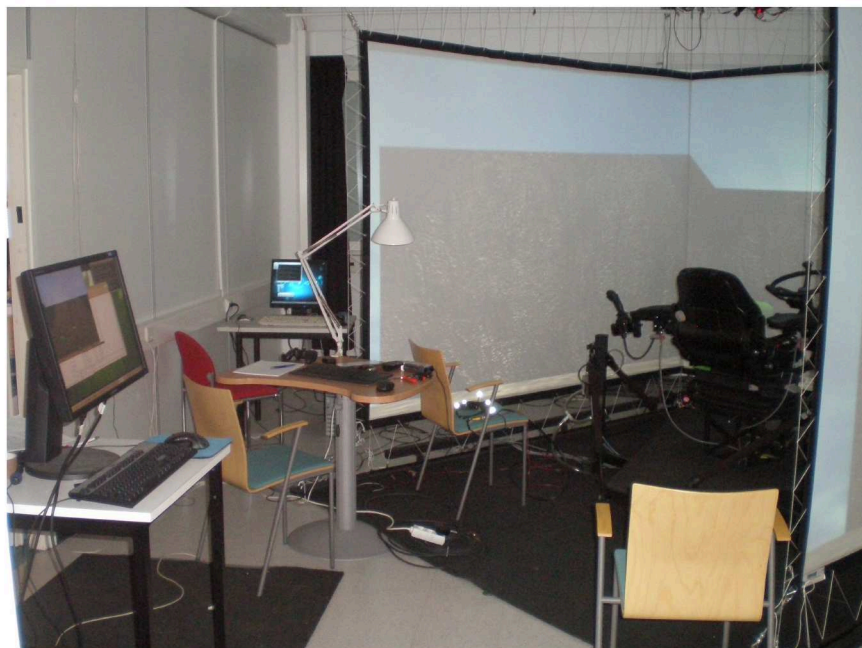
6.2 Testausympäristö

Testiympäristöksi luotiin staattinen virtuaaliympäristö (kuva 6.1), jossa käyttäjän edessä näkyi patsas, vihreä kuutio ja sininen pallo. Patsaan korkeus oli 4,9 metriä ja etäisyys testikäyttäjään noin seitsemän metriä. Pallon ja kuution olivat samassa linjassa patsaan kanssa ja niiden etäisyys testikäyttäjään oli hieman yli kahdeksan metriä.



Kuva 6.1: Testauksessa käytetty staattinen virtuaaliympäristö käyttäjän näkökulmasta suoraan eteenpäin katsottuna.

Fyysisenä testausympäristönä toimi Konstruktitekniikan laitoksen virtuaalilaboratorio, joka näkyy kuvassa 6.2. Laboratoriossa on kolmiseinäinen CAVE ja liikealusta, jonka penkissä testikäyttäjä istui testin aikana.



Kuva 6.2: Testauslaboratorio. Vasemmassa reunassa näkyy testin tarkkailijalle tarkoitettu näyttö. Pöydällä, johon työvalo on kiinnitetty, on ohjelmiston käyttöön tarkoitettu näppäimistö ja äänityslaite, jolla toistettiin tehtävän 1 sekvenssi. Näyttöpintojen keskellä näkyy liikealusta ja liikealustan penkki. Oikeassa alakulmassa näkyy tarkkailijan istumapaikka. Taustalla näkyvä tietokoneen näyttö ei liity testaukseen. Kuvasta poiketen testauksen aikana laboratoriossa oli pimeää ja virtuaaliympäristö näkyi kirkkaasti.

Virtuaaliympäristö heijastettiin 3D-videotykeillä taustaprojektiona kolmelle toistensa suhteen suorassa kulmassa olevalle näyttöpinnalle. Oikeanpuoleisinta näyttöpintaa jouduttiin käyttämään testin aikana ajettavien ohjelmien näyttönä. Käyttäjä istui testauksen aikana näyttöpintojen keskellä olevan liikealustan penkissä. Testihenkilöä tarkkailtiin takaa ja tarkkailijalle oli oma tietokone ja näyttö, jolta näkyi katseen osumakohta reaaliajassa. Näin voitiin havainnoida mahdollisia ongelmia sekä kalibroinnin onnistumista.

6.3 Testauksen rakenne

Testauksesta haluttiin mahdollisen yksinkertainen ja suoraviivainen, koska testilaitteisto osoittautui konstikkaaksi ja epävakaksi. Ohjelmien käynnistäminen piti suorittaa tietysti järjestyksessä ja, jos jokin vaihe epäonnistui, koko prosessi piti aloittaa alusta. Kalibrointi ei myöskään aina onnistu ja pään paikannus saattoi jumittua virheelliseen arvoon ilmeisesti pään paikannuksesta johtuvista tuntemattomaksi jääneistä syistä. Testaukseen karsiutui kolme tehtävää

1. katseella seuraaminen,
2. latenssin arviointi ja
3. vapaa palaute.

Katseella seuraamisen tarkoituksena oli tallentaa dataa järjestelmän tarkkuuden määrittämiseksi. Vapaan palautteen tarkoituksena oli selvittää käytön mukavuutta testikäyttäjän kannalta. Testien jälkeen järjestelmän käytön helppoutta ja mukavuutta haastateltiin testausta operoineelta testihenkilöstön jäseneltä käyttäen testauksen aikana havainnoinnin avulla kerättyä tietoa järjestelmän käytöstä ja ilmenneistä ongelmista.

Järjestelmän epävakauden takia yksittäisen testin keston haluttiin pysyvän ideaalisessa tapauksessa alle 15 minuutin, ettei mahdolliset ongelmat venyttäisi testausta kiusallisen pitkäksi. Integraatiotestaukseen ja käyttäjätestaukseen oli käytettävissä vain kolme työpäivää. Integroititestaukseen varattiin kaksi päivää ja käyttäjätestaukseen oli käytettävissä vain yksi työpäivä. Prototyypin testaukseen ei kuitenkaan ollut tarkoituksenmukaista käyttää suurta määrää testikäyttäjiä tai paljon aikaa, sillä testaus oli järjestelmän ensimmäinen testaus ja merkittävimmät ongelmat ja ominaisuudet oli mahdollista selvittää lyhyellä testauksella.

6.3.1 Taustatiedot ja testaussuostumus

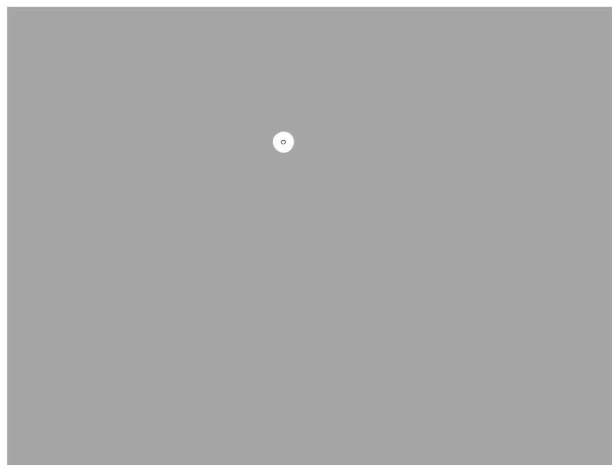
Tilaisuuden aluksi jokaiselle testikäyttäjälle selitettiin testauksen rakenne ja tarkoitus ja heitä pyydettiin allekirjoittamaan testaussuostumuslomake. Tämän jälkeen heiltä kysyttiin taustatietona muun muassa mahdollisista näköongelmista, kuten värisokeudesta ja silmälaseista.

Ennen testauksen alkua testikäyttäjälle muistutettiin, että testauksen voi keskeyttää milloin tahansa. Testikäyttäjiä kehoitettiin keskeyttämään testi tai ainakin huomauttamaan henkilökunnalle heti, jos testin aikana ilmenee pahoinvointia tai erityistä silmien väsymistä tai epämukavuutta.

6.3.2 Järjestelmän kalibrointi

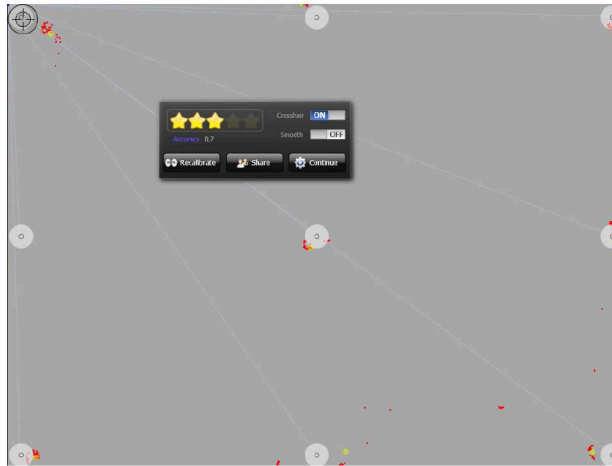
Ennen varsinaista testausta järjestelmä kalibroitiin jokaiselle testikäyttäjälle. Kalibroinnin haasteena oli virtuaalitekniikan laboratorion etummaisen näytön suuri koko, sen edessä sijaitseva näkökenttää peittävä liikealusta ja vaatimus siitä, että testikäyttäjän pitää pitää päätään paikallaan koko kalibroinnin ajan.

Nähdäkseen Gaze Trackerin kalibrointikuvion (kuvassa 6.3), testikäyttäjän pitää nähdä koko näyttö päätään kääntämättä. Lisäksi kokeellisesti oli havaittu, että kalibrointitulokset oli parempi, kun kalibrointi tapahtui kohtisuorassa kalibrointikuviota näyttävää näyttöä kohti katsottaessa. Näiden vaatimusten tyydyttämiseksi testikäyttäjän piti siis seisoa suhteellisen etäällä etummaisesta näyttöpinnasta kalibroinnin aikana. Varsinaisen testauksen aikana käyttäjä istui liikealustan tuolissa.



Kuva 6.3: Näkymä Gaze Trackerin kalibroinnista. Näkymä peittää koko näytön, jonka suhteen kalibrointi suoritetaan. Käyttäjä seuraa katseellaan kuvan valkoista palloa, joka pysähtyy hetkittäin satunnaisiin paikkoihin.

Kalibroinnin jälkeen Gaze Tracker näyttää kuvan, joka visualisoi Gaze Trackerin kalibroinnin onnistumista. Kuvassa 6.4 on esimerkki tällaisesta kalibroinnin laatua kuvaavasta kuvasta. Kuvasta voi esimerkiksi päätellä mitä ongelmia Gaze Trackerin kalibroinnissa mahdollisesti oli. Tästä syystä tämä kalibroinnin laatua visualisoiva kuva päätettiin tallentaa joka testikäyttäjän kalibroinnin jälkeen ruudunkaappauksena. Kuvista voitaisiin saada lisäinformaatiota testin aikana ilmenneiden ongelmien selvittämiseen.



Kuva 6.4: Esimerkki Gaze Trackerin kalibroinnin laatua kuvaava näkymä. Yleisarvosana on annettu tähdillä 1-5.

Gaze Tracker tarjoaa erillisessä ikkunassa videokuva silmästä. Mahdollisten ongelmien selvittämistä varten joka testikäyttäjän osalta päätettiin tallentaa ruudunkaappausena kuva tästä videosta. Koska esimerkiksi silmän paikka videokuvassa vaikuttaa seurannan onnistumiseen ja kameran asemointi oli kiinteä ruudunkaappauksesta voitaisiin päätellä mahdollisten ongelmien syitä. Summittainen kuva silmän paikasta videokuvassa kirjattiin myös paperille.

6.3.3 Tehtävä 1: Katseella seuraaminen

Tämän tehtävän tarkoituksena oli selvittää katseenseurannan tarkkuutta ja hajontaa sekä tulosten yhdenmukaisuutta eri käyttäjien välillä. Tehtävää varten äänitettiin sekvenssi jossa lueteltiin nopeaan tahtiin noin minuutin ajan neljää virtuaaliympäristössä näkyvää kohdetta. Kohteet olivat vihreä kuutio, sininen pallo, patsaan jalusta ja keihään kärki.

Tehtävä alustettiin testikäyttäjälle kertomalla, että nauhalta kuulu nopeaan tahtiin kyseisten kohteiden nimiä ja testikäyttäjää pyydettiin kohdistamaan katseensa aina siihen kohteeseen, jonka nimi kuuluu nauhalta. Kohteiden sijainti tehtiin testikäyttäjälle selväksi ja testin aluksi, ennen sekvenssin alkua, testikäyttäjää kehoitettiin kohdistamaan katseensa siniseen palloon.

Tarkoituksena oli, että seuratessaan kohteita nopeaan tahtiin testikäyttäjän katse ei harhailisi, vaan kohdistuisi lähinnä vain sekvenssiin kuuluviin kohteisiin ja hieman niiden välimaastoon, muodostaen selvät kasat lueteltujen kohteiden ympärille. Kasan halkaisija kertoisi hajonnan ja halkaisijan ja kohteen etäisyyden suhteen saataisiin silmämääräisesti katseenseurannan tarkkuus.

Testin aikana tallennettiin katseenseurantajärjestelmän lähettämää silmän paikkaa ja orientaatiota. Jokaisella arvolla oli aikaleima. Näiden arvojen avulla voitiin visualisoida tulokset, jotka on esitetty luvussa 7.

6.3.4 Tehtävä 2: Latenssin arviointi

Tämän tehtävän tarkoituksena oli silmämääräisesti arvioida katseenseurannan latenssia. Katseen osumakohta tehtiin testikäyttäjälle näkyväksi asetuksia muuttamalla ja häntä pyydettiin nopeaan tahtiin katsomaan vuoron perään reunimmaisista objekteja eli vihreää kuu-tiota ja sinistä palloa. Käyttäjää pyydettiin kuvailemaan kuinka suurella viiveellä katseen osumakohtaa kuvaava punainen pallo lähti seuraamaan testikäyttäjän käyttäjän katsetta testikäyttäjän siirrettyä katseensa nopeasti kohteesta toiseen. Testin tulokset ja niitä vastaavat huomiot kirjattiin paperille.

6.3.5 Tehtävä 3: Vapaa palaute

Kolmannen tehtävän tarkoituksena oli kerätä vapaata palautetta ja ajatuksia laitteistosta. Koska kyseessä oli ensimmäinen testaus, tavoitteena oli lähinnä suurimpien ongelmien ja ajatusten vangitseminen eikä niinkään yksityiskohtainen haastattelu. Tehtävän aikana käyttäjä sai leikkiä järjestelmällä niin että hän näki katseen osumakohdan tehtävän 2 ta-paan.

Tämä tehtävä aloitettiin kertomalla testikäyttäjälle, että varsinainen testaus on ohi. En-simmäiseksi testihenkilöltä kysyttiin miltä laitteen käyttö tuntui. Toisena kysymyksenä kysyttiin oliko testikäyttäjällä jotain ajatuksia laitteen kehittämiseksi tai parantamiseksi. Vapaan palautteen aikana esille tulleet merkittävät huomiot kirjattiin ylös paperille. Jo-kaiselta käyttäjältä tuli muutamia huomioita. Yhteensä huomioita kertyi kolme sivullista. Tulokset purettiin vasta noin viikon kuluttua testauksesta.

6.4 Testikäyttäjät

Testikäyttäjiksi ja pilottiin otettiin yhteensä kuusi Tampereen teknillisen yliopiston opis-kelijaa. Testikäyttäjiksi rekrytoitiin opiskelijoita, koska se oli käytännöllisin ja helpoin tapa saada testikäyttäjia, eikä testauksen tavoitteet ja luonne asettanut erityisiä vaatimuk-sia testikäyttäjille. Testikäyttäjille ei maksettu tai annettu palkkiota testauksesta. Ainoa "palkkio" oli mahdollisuus tutustua virtuaaliympäristöön ja katseenpaikannukseen. Kaik-ki testikäyttäjät olivat nuoria (22-31v.) miehiä. Yhdelläkään ei ollut silmälaseja tai näkö-ongelmia. Testikäyttäjät olivat teknisesti suuntautuneita ja kaikki olivat pelanneet ainakin jotain tietokonepelejä. Kaikki olivat myös käyneet 3D-elokuvissa.

Koska testaus oli luonteeltaan funktionaalinen ja testitehtävät pääasiassa mekaanisia, testikäyttäjia ei yksilöity tulosten analysoimiseksi. Tässä kehitysvaiheessa ei tavoitteiden kannalta katsottu tarpeelliseksi kartoittaa testikäyttäjien taustaa tai fysiologiaa syvällises-ti. Testihenkilöiden taustan ei oletettu vaikuttavan merkittävästi testitehtävien suorittami-seen vapaata palautetta lukuun ottamatta.

7. KÄYTTÄJÄTESTAUKSEN TULOKSET

7.1 Pilotti

Pilottitestauksessa havaittiin äänitetyn sekvenssin olevan liian nopea. Testikäyttäjä ehti juuri ja juuri kohdistaa katseensa edelliseen objektiin, kun seuraava jo kuului nauhalta. Tämän oletettiin haittaavan testiä jonkin verran, mutta onneksi toiston nopeutta opittiin säätämään heti ensimmäisen testikäyttäjän jälkeen. Äänityksen kokonaiskesto todettiin sopivaksi.

Sekvenssin äänityksen aikana tehtiin kaksi tahallista virhettä. Kerran mainittiin vihreän kuution sijaan sininen kuutio ja sinisen pallon sijaan vihreä pallo. Tarkoituksena oli erotella datasta esimerkin omaisesti miten testikäyttäjän katse käyttäytyy, kun sekvenssissä on objekti, jonka nimi alkaa sekvenssistä tutun objektin värillä, mutta loppuosa niimestä paljastaa objektin olevan tuntematon. Äänityksessä olevat kaksi tahallista virhettä todettiin kuitenkin pilotissa hyödyttömiksi. Niiden aikana tapahtuvien silmän liikkeiden erittely ja analysointi olisi vienyt suhteettoman paljon aikaa, eikä tuloksena oltaisi voitu odottaa mitään jatkokehityksen kannalta erityisen hyödyllistä.

Äänityksestä ei kuitenkaan ehditty poistamaan kahta tahallista virhettä varsinaisia testejä varten. Tämän ei katsottu pilaavan tuloksia, sillä kahden tahallisen virheen aikana mahdollisesti syntyvät katseen harhailut olisivat kestoltaan hyvin lyhyitä koko testin keston nähden.

3D-katseenseurantalasien videokaapelina käytettiin tarkoitukseen huonosti soveltuvaa paksua audiokaapelia, koska sopivaa videokaapelia ei ollut saatavissa. Pilottitestissä todettiin, että testikäyttäjän pitää ottaa kädellä kiinni kaapeleista keventääkseen lasihin tulevaa vetoa. Muuten lasit eivät pysyneet paikoillaan.

Kalibroinnin kanssa oli erinäisiä ongelmia. Kalibrointia ei voitu suorittaa liikealustan penkissä istuen. Penkki on niin lähellä etummaista näyttöä, ettei näkökenttä ylety 3D-lasien kanssa päätä kääntämättä joka kulmaan. Kalibrointi piti siis suorittaa liikealustan takaa. Kalibroinnin huomattiin toimivan vain silloin, kun käyttäjä on kohtisuorassa kohti kalibrointikuviota näyttävää näyttöä. Liikealusta peitti näkökenttää niin paljon, ettei kalibrointi onnistunut liikealustan takaa kuin seisaaltaan.

Latenssin arviointitehtävä todettiin hankalaksi. Järjestelmän latenssi osoittautui jo integraatiotesteissä hyvin lyhyeksi ja pilotissa latenssin arviointi sekunneissa silmämääräisesti oli testikäyttäjälle hieman hankalaa. Koska arvion antaminen sekunnin murto-osissa oli kömpelöä, päätettiin käyttäjiltä lähinnä kysyä seuraako katseen osumakohtaa kuvaava

pallo katseen siirtyessä katsetta välittömästi eli reaaliajassa, lähes heti eli lähes reaaliajassa vai onko latenssia kenties enemmän. Lisäksi latenssia päätettiin mitata testaushenkilöstön toimesta sekuntikellolla, koska luotettavamman mittausjärjestelyn suunnittelu ja toteutus olisi ollut monimutkainen tehtävä. Sekuntikelloa referenssinä käyttäen voitaisiin karkeasti arvioida, onko latenssi alle 0,1 sekuntia.

7.2 Tehtävä 1: Katseella seuraaminen

Tehtävä 1 muodosti koko testauksen selkärangan. Sen aikana kerättiin dataa silmän paikasta ja orientaatiosta. Tätä dataa analysoitiin visualisoimalla katseen osumakohdat virtuaaliympäristöön. Datasta visualisoitiin ja analysoitiin pääasiassa neljä eri ajanjaksoa.

Ensin datasta erotettiin tallennuksen alusta ajanjakso, jonka aikana testikäyttäjä tuijotti sinistä palloa sekvenssin alkua odottaessaan. Tämän ajanjakson visualisoinnista oli tarkoitus nähdä kuinka tarkasti katse osuu siniseen palloon (ulkoinen tarkkuus) ja kuinka paljon hajontaa katseen osumakohdille syntyy (sisäinen tarkkuus).

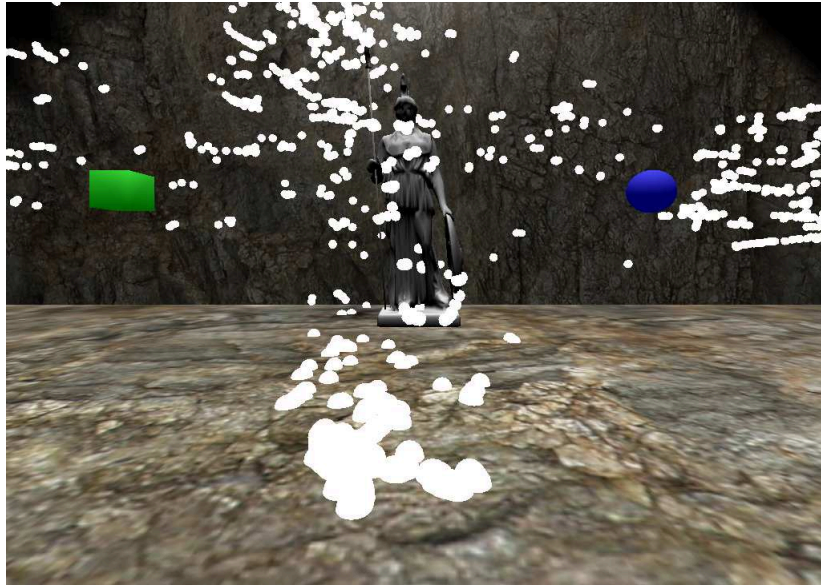
Tämän jälkeen visualisoitiin koko tehtävän 1 data sekvenssin alusta sekvenssin loppuun. Tähän dataan ei siis kuulunut alun tuijotus. Koko tehtävän datasta oli tarkoitus tarkastella katseen osumakohtien muodostamien kasojen kokoa ja sijaintia. Näistä voitiin päätellä muun muassa järjestelmän sisäistä ja ulkoista tarkkuutta eri suuntiin katsottaessa.

Viimeiseksi koko tehtävän datasta visualisoitiin jokaisen testikäyttäjän osalta ensimmäiset 10 sekuntia ja viimeiset 10 sekuntia. Näitä kuvia vertailemalla haluttiin tarkastella muuttuuko tulokset testin aikana esimerkiksi 3D-katseenseurantalasien valumisen takia.

7.2.1 Koko tehtävän data

Kokonaiskuvan saamiseksi ensimmäiseksi visualisoitiin ja analysoitiin jokaisen testikäyttäjän osalta koko sekvenssin aikana syntyneet katseen osumakohdat. Tässä, kuten muisakin tapauksissa visualisointi tehtiin suunnilleen siitä näkökulmasta, josta testikäyttäjä näki virtuaaliympäristön testauksen aikana.

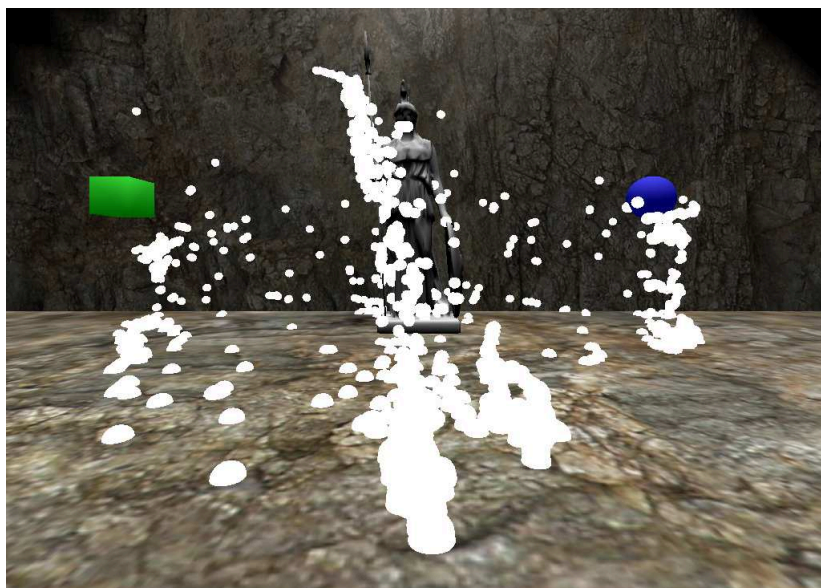
Ensimmäisen testikäyttäjän kohdalla kalibrointi ei onnistunut tyydyttävästi edes toisella yrittämällä. Käyttäjän silmä jäi silmänseurantakameran kuvassa aivan kuvan alarajalle, vaikka hän siirsi lasit ulommas nenälle. Tämä selittää suuren hajonnan ensimmäisen testikäyttäjän koko tehtävän datassa, joka on esitetty kuvassa 7.1. Jokainen kuvissa näkyvä valkoinen pallo edustaa katseen osumakohtaa. Keihäänkärjen ja vihreän kuution osalta selvää kasaa ei ole edes havaittavissa.



Kuva 7.1: 1. testikäyttäjän katseen osumakohdat koko tehtävän 1 ajalta. Alkuperäisissä kuvissa ja ohjelman ajon aikana katseen osumakohta näkyy punaisena pallona, mutta mustavalkotulostusta silmällä pitäen pallot on editoitu valkoisiksi.

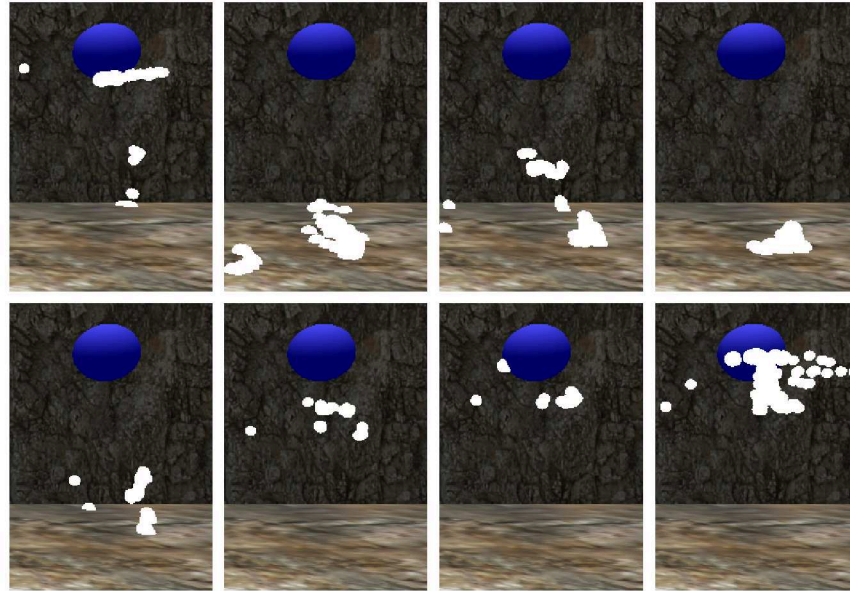
Ensimmäisen testikäyttäjän tulokset eivät olleet lupaavia. Suureen hajontaan osasyylisenä pidettiin myös sekvenssin nopeutta. Testikäyttäjä pystyi vain vaivoin seuraamaan katsellaan äänitteeltä kuuluvien kohteiden sekvenssiä. Onneksi löysimme ensimmäisen testihenkilön testauksen jälkeen äänityslaitteesta toiminnon, jolla toistoa sai hidastettua.

Toiselle testikäyttäjälle äänitys soitettiin 0,7 kertaisella nopeudella. Toisen testikäyttäjän kohdalla kalibrointi onnistui suhteellisen hyvin ja koko tehtävän data vaikuttikin paremmalta. Kasat vaikuttivat kuitenkin pitkulaisilta, ne ikään kuin valuivat alaspäin. Kuvassa 7.2 on visualisoituna toisen testikäyttäjän koko tehtävän 1 katseen osumakohdat.



Kuva 7.2: 2. testikäyttäjän katseen osumakohdat koko tehtävän 1 ajalta.

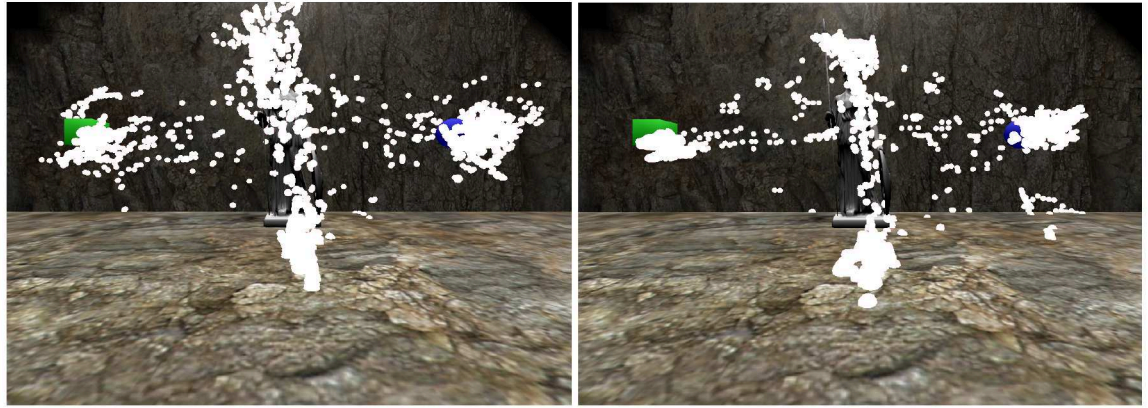
Koska kasojen muoto oli pitkulainen, mutta kalibrointi oli onnistunut kohtalaisen hyvin päätettiin toisen testikäyttäjän dataa analysoida tarkemmin. Koko tehtävän 1 testidata jaettiin kymmenen sekunnin jaksoihin ja jokainen jakso visualisoitiin erikseen. Visualisoinnissa näkyi merkittävää pystysuuntaista liikettä. Kuvassa 7.3 näkyy kuinka osumat tippuvat ensin alas ja testin lopussa kasa nousee jälleen ylös.



Kuva 7.3: Toisen testikäyttäjän katseen osumakohdat tehtävän 1 ajalta jaettuna 10 sekunnin jaksoihin. Ensimmäisessä kuvassa vasemmalla ylhäällä näkyy osumat ajalta 10-20 sekuntia. Kuvat etenevät vasemmalta oikealle ja ylhäältä alas. Viimeisessä kuvassa oikealla alhaalla näkyy osumat 80 sekunnin kohdalta tehtävän loppuun.

Selvää syytä toisen testikäyttäjän osumien pystysuuntaiselle liikkeelle ei löydetty. Kasojen liikkeen määrän ja suunnan perusteella on kuitenkin varsin todennäköistä, että kasojen liike aiheutui 3D-lasien liikkeistä. Jos 3D-katseenseurantalaset valuvat nenällä niin kasa nousee ylös. Kasa kuitenkin laski ensin alas. Voi olla, että testin aikana testikäyttäjä veti vahingossa 3D-katseenseurantalasien johdoista ja tämän takia kasa siirtyi. Merkillepantavaa kuitenkin on, että hajontaa on vähän, joten sisäinen tarkkuus vaikuttaa tässäkin tapauksessa hyvältä.

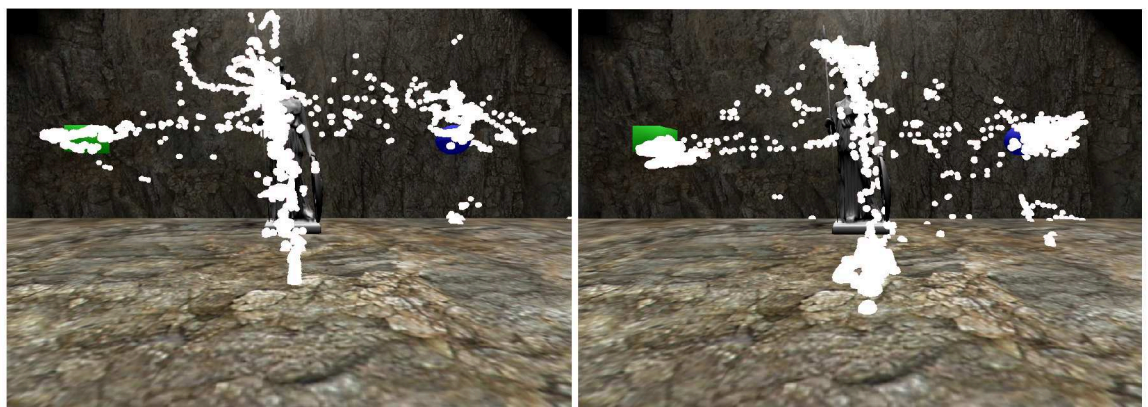
Kolmannen, neljännen ja viidennen testikäyttäjän kohdalla kalibrointi onnistui niin ikään suhteellisen hyvin. Lisäksi tehtävän aikana kasat eivät liikkuneet, joten dataa oli helpompi analysoida. Kuvassa 7.4 on kolmannen ja viidennen testikäyttäjän koko datan visualisoinnit vierekkäin. Molemmilla kasat ovat varsin hyvin oikealla kohdalla, mutta kolmannella testihenkilöllä sisäinen tarkkuus on selvästi huonompi eli kasat ovat enemmän hajallaan.



Kuva 7.4: Kolmannen (vasemmalla) ja viidennen testikäyttäjän koko tehtävän 1 datan visualisoinnit. Kasat ovat hyvin kohdillaan, mutta kolmannella testikäyttäjällä on selvästi enemmän hajontaa.

Kolmannen testikäyttäjän osumien suurempi hajonta saattaa selittyä pelkästään sillä, että kolmannelle testihenkilölle sekvenssi toistettiin 0,9 kertaisella nopeudella ja viidennelle testihenkilölle 0,8 kertaisella nopeudella. Viidennellä testikäyttäjällä oli siis peräti 12,5% enemmän aikaa jokaisen kohteen kanssa. Tätä tulkintaa tukee myös neljännen testikäyttäjän data. Neljännelle testikäyttäjälle sekvenssi soitettiin samalla nopeudella kuin viidennelle ja neljännellä testikäyttäjällä hajontaa on myös selvästi vähemmän kuin kolmannelle.

Neljännän testihenkilön kuitenkin havaittiin suorittavan tehtävää eri tyyllillä. Sen sijaan, että hän olisi siirtänyt katseensa kohteesta toiseen äänitteeltä kuuluvan sekvenssin mukaan, hän palautti katseen suunnilleen keskelle patsasta pelkästään vilkaistuaan äänitteeltä kuulunutta kohdetta. Tämä selittää, miksi neljännen testikäyttäjän osumien kuvio on eri näköinen. Osumat kohteisiin ovat silti vähintään yhtä tarkkoja kuin viidennellä testihenkilöllä. Kuvassa 7.5 on neljännen ja viidennen testikäyttäjän visualisoinnit vierekkäin.



Kuva 7.5: Neljännen (vasemmalla) ja viidennen testikäyttäjän koko tehtävän 1 datan visualisoinnit. Äänite soitettiin samalla nopeudella ja osumilla on suunnilleen sama hajonta. Neljännen testikäyttäjän kuvio on eri näköinen johtuen eri tavasta suorittaa tehtävää.

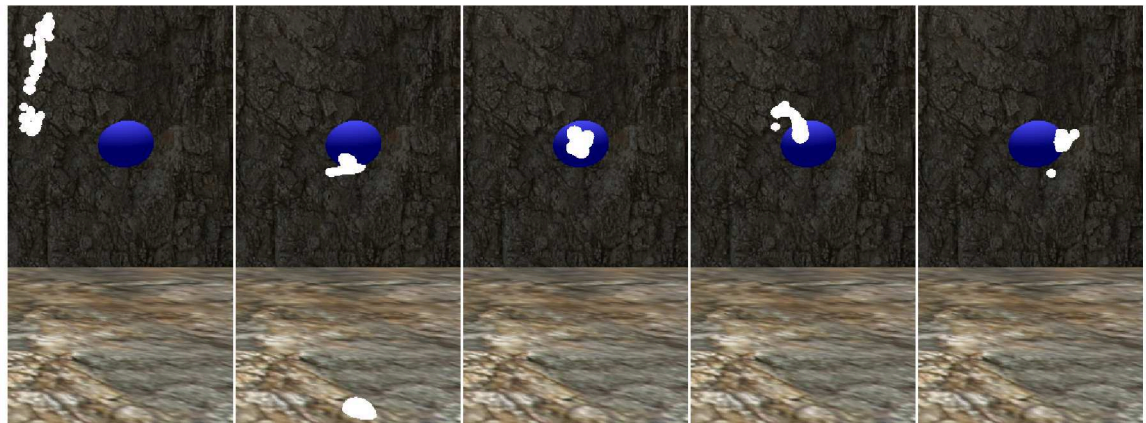
Kuvista huomataan myös sellainen seikka, että keihään kärjen kasat ovat muita kasoja huonompia. Tämä selittyy mahdollisesti sillä, että keihään kärkeen saattoi olla vaikeampaa kohdistaa katse. Keihään kärki oli hyvin pieni ja vaikeasti erottuva kohde. Harmaa keihäs harmaalla taustalla erottui paljon huonommin kuin vihreä kuutio tai sininen pallo.

Sama seikka saattaa selittää myös sitä, miksi patsaan jalustan kasa jäi kaikilla hieman alas. Osasyynä tähän saattaa silti olla myös kalibroinnin ongelmat, sekä datan visualisoinnissa mahdollisesti oleva virhe. Tarkkaa selitystä ilmiölle ei tämän testauksen tuloksien avulla voida antaa.

Tehtävän 1 koko datan visualisoinnista saadut tulokset olivat kaiken kaikkiaan hyvät, sillä kuvista näkyy, että katseen osumakohtien kasat ovat ongelmatilanteet huomioiden varsin siistit ja kohdallaan. Näin ollen sisäinen ja ulkoinen tarkkuus osoitettiin varsin hyvin. Suurin syy ongelmiin osoittautui olevan järjestelmän kalibrointi. Ensimmäisellä testikäyttäjällä kalibrointi saattoi epäonnistua siksi, että hänen silmänsä oli aivan katseen-seurantakameran kuva-alan alareunassa.

7.2.2 Tuijotus

Varsin hyvää sisäistä ja ulkoista tarkkuutta ilmentää myös tuijotuksen data. Joka testihenkilö tuijotti sinistä palloa muutaman sekunnin sekvenssin alkua odottaessaan. Tuijotuksen aikana syntyneiden katseen osumakohtien visualisointi kaikilta testikäyttäjiltä näkyy kuvassa 7.6.



Kuva 7.6: Jokaisen testikäyttäjän tehtävän 1 alkua edeltävän tuijotuksen aikaisten katseen osumakohtien visualisoinnit. Tuijotusten kestot vaihtelivat 3,2 sekunnista 6,8 sekuntiin. Vasemmanpuoleisin visualisointi on ensimmäiseltä testikäyttäjältä. Kasa on huono ja selvästi ohi sinisestä pallosta epäonnistuneen kalibroinnin takia. Lopuilla testikäyttäjistä kalibrointi onnistui tyydyttävästi ja kasat osuvat varsin hyvin siniseen palloon ja hajontaa on vähän.

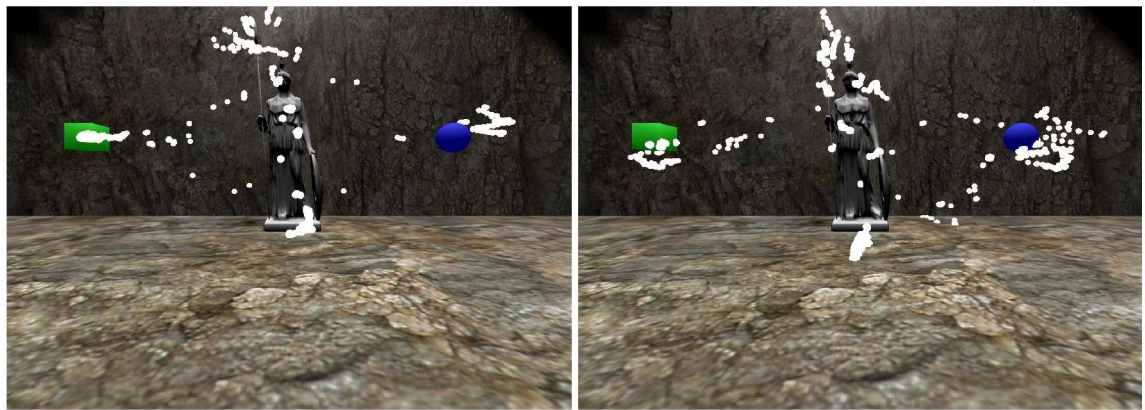
Ensimmäisen testikäyttäjän kasan hajonta ja huono ulkoinen tarkkuus on jälleen selitettävissä epäonnistuneella kalibroinnilla. Toisen testikäyttäjän visualisoinnissa näkyvä

yksittäinen osumakohta kuvan alareunassa muistuttaa järjestelmässä esiintyvistä häiriöistä. Tämä yksittäinen osuma ei voi johtua katseen harhaantumisesta. Näytteenottotaajuus on liian korkea. Jos kyseessä olisi katseen harhaantuminen osumakohtia olisi enemmän.

Koska tämän datan tallennuksen aikana dataan ei vaikuttanut sekvenssin nopeus, visualisointi vahvistaa käsitystä siitä, että kolmannen testikäyttäjän kasojen hajonta johtui nimenomaan sekvenssin nopeudesta. Tuijotuksen aikana kolmannen testikäyttäjän kasa on itse asiassa kaikkein tarkimmin kohdallaan eikä siinä ole hajontaa juuri ollenkaan.

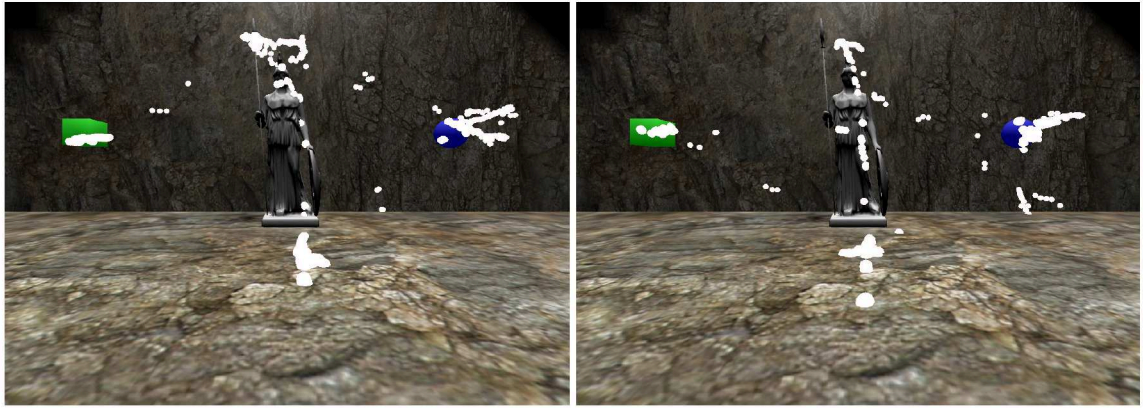
7.2.3 Tulosten muuttuminen

Ensimmäistä testikäyttäjää lukuun ottamatta jokaisen testikäyttäjän tehtävän 1 datasta erikseen visualisoidut 10 sekunnin jaksot alusta ja lopusta osoittivat tulosten muuttuvan vain hyvin vähän testin kuluessa. Kasojen koko ja sijainti olivat lähes samat lukuun ottamatta testikäyttäjää 2, jonka dataa analysoitiin tarkemmin (kuva 7.3). Kuvassa 7.7 on kolmannen testikäyttäjän tehtävän 1 alun ja lopun visualisoinnit vierekkäin. Kuvista näkyy kuinka kasat laskevat hivenen.



Kuva 7.7: Kolmannen testikäyttäjän tehtävän 1 datan ensimmäisen kymmenen sekunnin visualisointi vasemmalla ja oikealla viimeisen 10 sekunnin visualisointi. Kasojen paikka laskee hivenen, mutta ei merkittävästi ajan kuluessa.

Kasojen laskeminen on päinvastaista sen oletuksen suhteen, että 3D-katseenseurantalasit valuisivat. Lasien valuminen aiheuttaisi kasojen nousemisen, sillä kameran suhteen silmä nousee jos kamera laskee. Kuvassa 7.8 näkyy viidennen testikäyttäjän datan alun ja lopun visualisointi, joissa näkyy pientä muutosta ainoastaan vihreän kuution kasassa.



Kuva 7.8: Viidennen testikäyttäjän tehtävän 1 datan ensimmäisen kymmenen sekunnin visualisointi vasemmalla ja oikealla viimeisen 10 sekunnin visualisointi. Kasojen paikka ei muutu lähes lainkaan ajan kuluessa.

Myös toisella testikäyttäjällä kasojen sijainti oli ensimmäisen ja viimeisen kymmenen sekunnin aikana lähes sama, vaikka testin keskivaiheilla tapahtuikin pystysuuntainen notkahdus. Myöskään kasojen hajonta ei kasvanut testin kuluessa. Testikäyttäjän 1 datasta ei analysoitu alun ja lopun jaksoja ollenkaan, koska koko tehtävän tuloksena ei muodostunut selviä kasoja. Neljännen testikäyttäjän datasta ei voitu päätellä mitään tulosten muuttumisen suhteen, sillä katseen osumat eivät muodostaneet selviä kasoja ensimmäisen 10 sekunnin aikana. Tämä johtui mitä ilmeisimmin neljännen testikäyttäjän poikkeavasta tekniikasta.

7.3 Tehtävä 2: Latenssin arviointi

Kaikki testihenkilöt arvioivat tehtävässä 2 katseen osumakohtaa visualisoivan punaisen pallon liikkuvan lähes reaaliajassa. Koska järjestelmän latenssin voidaan olettaa olevan kaikille sama, arvioitiin latenssia myös sekuntikelloa käyttäen. Kaksi testaushenkilöstön jäsentä mittasi latenssia sekuntikellolla usean kerran. Sekuntikelloa referenssinä käyttäen järjestelmän latenssin arvioitiin olevan alle 0,1 sekuntia. Kaiken kaikkiaan latenssi osoitautui siis erittäin hyväksi.

7.4 Tehtävä 3: Vapaa palaute

Vapaa palaute jäi tarkoituksella niukaksi. Ensimmäisen prototyypin testauksessa tarkoitus oli suurimpien ongelmakohtien löytäminen. Vapaan palautteen aikana käyttäjät näkivät järjestelmän laskeman katseen osumakohtan reaaliajassa. Päällimmäiseksi palautteeksi nousi positiiviset kommentit mielenkiinnon osoituksena. "Siistii!" kuultiin toisen testikäyttäjän suusta. "Aika kiva!" kommentoi kolmas testikäyttäjä. Kaikki testihenkilöt näyttivät selvästi kiinnostuneilta.

Toisaalta esille nousi 3D-lasien epämukavuus ja epäkäytännöllisyys. Lasien painavat

johdot häiritsivät käyttöä. Yksi testikäyttäjä ehdotti, että kaapelit voisi kiinnittää vyölle kiinnitettävään solkeen vedonpoistolla ja mietti saisiko lasista kokonaan langattomat. Sama käyttäjä mainitsi lasista lähtevän johdon menevän ikävästi korvan päälle.

Lasien valumisesta kuultiin negatiivista palautetta kahdelta testikäyttäjältä, vaikka testitulosten perusteella lasit näyttivät pysyvän varsin tukevasti paikoillaan. Tunne lasien valumisesta saattaa johtua pelkästään niiden painosta. Yksi testikäyttäjä edellisten lisäksi mainitsi lasien olevan hieman painavat. Tunne lasien painavuudesta voi johtua osittain niiden heikosta istuvuudesta.

Myös ledivalaistuksen lämpö koettiin epämiellyttäväksi. Tästä asiasta mainitsi tavalla taikka toisella peräti 4/5:stä testikäyttäjää. "Lämmittää aika hyvin" kommentoi kolmas testikäyttäjä. Toinen käyttäjä kommentoi, että jos ledeihin koskisi niin varmasti polttaisi. Korjausehdotuksena esitettiin ledien siirtämistä linssin taakse ja herkemmän kameran käyttöä ledien tehon vähentämiseksi.

7.5 Toimintavarmuus

Järjestelmä todettiin hankalaksi. Gaze Trackerin asetuksia piti säätää erikseen jokaiselle käyttäjälle, koska automaattinen säätö osoittautui epäluotettavaksi. Testauksessa käytetty 64-bittinen Gaze Trackerin versio ei myöskään onnistunut tunnistamaan videosta silmää, vaan ainoastaan pupillin.

Silmän seurantatuloksessa oli usein myös häiriötä, jonka oletettiin tulevan ainakin osittain pään paikannuksen kautta, sillä kaikki pään paikannuksen virheet siirtyivät katseen seurantaan. Häiriöt aiheuttivat katseen osumakohtaan käyttäjäästä riippumattomia levottomia liikkeitä, jotka heikensivät sisäistä tarkkuutta. Pään paikannus tuotti lisäksi ainakin kolmella testihenkilöllä virhetilanteen, jossa katseenseurannan osuma tippui esimerkiksi lähelle testikäyttäjän jalkoja, vaikka hän katsoi suoraan eteenpäin.

7.6 Kameran aseointi

Kameran aseointi osoittautui huonoksi. Jokaisen testikäyttäjän silmä oli aivan videon alarajalla. Kolme testikäyttäjää, joutui siirtämään 3D-katseenseurantalaseja hieman nenälle, jotta pupilli näkyisi kunnolla katseenseurantakameran kuvassa. Käsien muistiinpanoihin piirretyt kuvat silmien paikoista löytyy luvusta 7.8. Etenkin ensimmäisellä testikäyttäjällä pupilli saattoi kalibroinnin ja testin aikana kadota näkyvistä. Tämä saattaa selittää ensimmäisen testikäyttäjän kalibroinnin epäonnistumisen.

7.7 Käyttömukavuus testaushenkilöstön kannalta

Testihenkilöstölle laitteiston ja ohjelmiston valmistelu ja ohjelmiston käyttö testin aikana oli varsin puuduttavaa. Asennusvaiheessa huomattiin, että videonkaappauslaite ei toimi

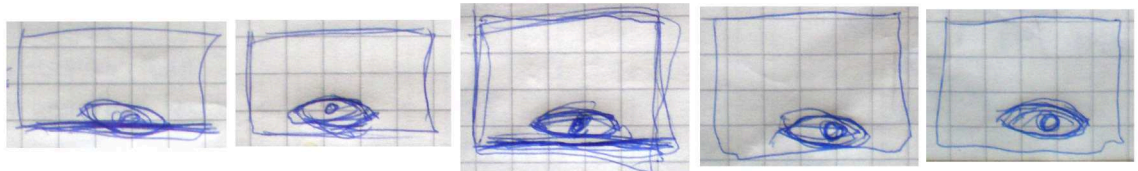
USB-jatkojohdon yli. Gaze Trackerista 64-bittinen version asetusten tekeminen oli hankalaa. Käyttöliittymä unohti asetukset, jos tietokoneen käynnisti uudelleen, vaikka asetusten piti tallentua. Myös seurannan parametrien valitsimet Gaze Trackerin käyttöliittymässä toimivat väärin, ja toimimaan saatiin lopulta vain pupillin paikannus.

Käyttömukavuutta heikensi myös useat tarvittavat ohjelmat. Ensin piti käynnistää Gaze Trackerin kalibrointi ja heti sen jälkeen Eye Tracker, testikäyttäjän vielä pitäessä päätään paikallaan. Ohjelmat piti käynnistää konsolista, joka ponnahti aina testikäyttäjän edessä olevalle näytölle. Ikkunoiden sulkeminen ja raahaaminen sekoitti tilannetta entisestään. Myös tallennus piti aloittaa manuaalisesti ja tiedoston nimi piti muistaa vaihtaa, ettei tallennus tulisi edellisen tallennuksen päälle. Jos prosessi kompasteli, se piti aloittaa aivan alusta. Onneksi näin tapahtui vain kerran. Ohjelmien aiheuttamat hankaluudet eivät haitanneet testausta merkittävästi, sillä ohjelmien käynnistyksestä vastannut henkilö oli kokenut ja selviytyi tehtävästä sujuvasti.

7.8 Puuttuvat ruudunkaappaukset

Jokaisen testin alussa piti käyttäjän katseenseurantakameralta Gaze Trackerille tulevasta videosta ottaa kuva. Koejärjestelyn monimutkaisuuden takia näiden ruudunkaappausten ottaminen epäonnistui. Samoin epäonnistui kalibroinnin laatua indikoivien näkymien tallennus. Epäonnistuminen johtui siitä, että testauksen tarkkailijalle tarkoitettu näkymä oli käynnissä eri tietokoneella kuin ohjelmat, joista ruudunkaappaukset oli tarkoitus ottaa.

Onneksi paperimuistiinpanoihin kirjattiin ylös silmän paikka katseenseurantakameran kuvassa suurin piirtein. Nämä estimaatit on esitetty kuvassa 7.9 ja ne riittivät tulosten analysointiin. Kuten kuvasta näkyy, ensimmäisen testikäyttäjän silmä ei mahtunut kokonaan kuvaan ja tämä lienee suurin syy sille, että ensimmäisen testikäyttäjän kalibrointi epäonnistui. Muiden käyttäjien kohdalla silmä mahtui kuvaan, mutta jäi kuvan alareunaan. Tämän takia kameran asemointia kannattaa muuttaa, mikäli 3D-katseenpaikannuslaseista tehdään uusi versio.



Kuva 7.9: Käsien muistiinpanoihin piirretyt kuvat testikäyttäjien silmien paikasta katseenseurantakameran kuvassa.

7.9 Tulosten yhteenveto

Testit onnistuivat pienistä epäonnistumisista ja ongelmista huolimatta hyvin, sillä prototyyppi osoitettiin toimivaksi ja vieläpä esittelykelpoiseksi. Järjestelmän latenssi todettiin hyvin pieneksi ja tarkkuus, kuten edellä esitellyistä kuvista näkyy, riittäväksi esittelykäyttöön.

Kameran aseointi osoittautui huonoksi. Kaikkien testikäyttäjien silmät jäivät videokuvan alarajalle. Ensimmäisellä testikäyttäjällä silmän jääminen osittain kameras kuvan ulkopuolelle oli todennäköisesti oli suurin syy kalibroinnin epäonnistumiselle.

Järjestelmässä oli jonkin verran häiriötä, jonka oletetaan tulevan pääasiallisesti paikannuksesta. Häiriö heikensi järjestelmän sisäistä tarkkuutta, mutta tarkka määrä jäi epäselväksi. Lisäksi tehtävässä 1 hajontaa aiheutti tehtävässä käytetyn sekvenssin kohtalaisen suuri nopeus. Tämä tulee huomioida tarkasteltaessa tehtävän 1 dataa sisäisen ja ulkoisen tarkkuuden kannalta.

Odotuksista poiketen katseenseurannan tulos ei muuttunut testin kuluessa. Oletus ja palaute siitä, että 3D-katseenseurantalaset valuvat, ei siis näytä pitävän paikkansa. Testi oli kuitenkin varsin lyhyt. Pidemmän ajan kuluessa valumista varmasti tapahtuu.

Testikäyttäjät kokivat järjestelmän mielenkiintoiseksi. Testihenkilöstölle järjestelmän käyttö on tällaisenaan kuitenkin varsin epämiellyttävää ja hankalaa. Järjestelmä oli liian monimutkainen huomioiden, että myös tähän työhön kuulumattomat ohjelmat kuten datan tallennusohjelma, olivat niin ikään hieman hankalia.

Järjestelmän latenssi osoittautui odotuksia paremmaksi. Latenssi oli niin lyhyt, ettei sen tarkka mittaaminen käytetyssä testijärjestelyssä ollut mahdollista. Katseen paikkaa indikoiva punainen pallo siirtyi lähes täydellisesti katseen mukana. Latenssia arvioitiin olevan alle 0,1 sekuntia.

8. POHDINTAA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä toteutettiin katseenseurantajärjestelmän prototyyppi Konstruktiotekniikan laitoksen CAVE-virtuaaliympäristöön. Työ toteutettiin Sandvikin pyyntöön perustuen, koska soveltuva kaupallista järjestelmää ei ollut tarjolla. Järjestelmän oli tarkoitus olla esiteltävissä yritysvieraille ja kehitettävissä tutkimuskäyttöön, mikäli kiinnostusta ilmenee. Järjestelmään kuului 3D-katseenseurantalasit ja katseen suunnan ja silmän paikan virtuaaliympäristön koordinaatistossa laskeva ohjelmisto. Tämän opinnäytteen puitteissa suoritettiin myös käyttäjätestaus, jolla osoitettiin järjestelmän toimivuus, arvioitiin katseenseurannan tarkkuutta ja latenssia sekä järjestelmän käyttömukavuutta henkilökunnan ja testikäyttäjän näkökulmasta.

3D-katseenpaikannuslasit rakennettiin CAVE-ympäristössä käytettävien 3D-lasien päälle. 3D-lasien kehykseen toisen linssin alareunaan kiinnitettiin katseenpaikannuskamera. Asennuksessa käytettiin isosta paperiliittimestä taiteltua runkoa ja epoksiliimaa. Runko peitettiin mattamustalla teipillä infrapunataajuudella toimivaa paikannusjärjestelmää häiritsevien heijastusten ehkäisemiseksi. Katseenpaikannuskameran valaistuksena käytettiin 3D-lasien sisäpuolelle liimalla asennettuja infrapunaledejä, jotka saivat virran tietokoneen USB-liitimestä.

3D-lasien kehittämisessä keskityttiin alussa liikaa fyysiseen kokoon. Kamera haluttiin lähes näkymättömäksi ja todella lähelle 3D-lasien linssiä tai jopa sen sisäpuolelle. Näin kameroiksi valittiin kooltaan hyvin pieniä kameroita, joiden kuvanlaatu ei kuitenkaan riittänyt myöhemmin käyttöön otetulle Gaze Trackerille. Aikaa tuhraantui myös 3D-lasien polarisaatiosuotimien leikkelyyn, jotka myöhemmin todettiin läpäisevän infrapunaa lähes esteettä. Lopullisessa kokoonpanossa paperiliittimestä muotoiltu runko suunniteltiin niin tukevaksi, että kameran kääntäminen runkoa taittamalla ei onnistunut käyttäjätestauksen aikana, kun huomattiin, että ensimmäisen testikäyttäjän silmä jää kameran kuvan alarajalle.

Järjestelmän ohjelmisto haluttiin alun perin toteuttaa yhtenä kokonaisuutena käyttäen hyväksi vapaasti saatavilla olevaa koodia pupillin paikan tunnistamiseksi videokuvasta. Kehitystyön alkumetreillä kuitenkin havaittiin, että videon käsittely ja kalibroinnin toteuttaminen vaatisivat kohtuuttomasti aikaa. Niinpä käyttöön otettiin Gaze Tracker, joka huolehti videon käsittelystä ja katseenseurannasta kalibroitinäyttöä vastaavan 2D-tason suhteen. Tässä työssä toteutettu ohjelma transformoi tuloksen virtuaaliympäristöön käyttäen apuna VRPN rajapinnan yli vastaanotettua pään paikkaa ja orientaatiota, sekä ka-

libroinnin aikana tallennettuja vakioarvoja. Ohjelma laski silmän paikan ja orientaation virtuaaliympäristössä ja tarjosi sitä VRPN paikantimena.

Ohjelmiston kehityksestä teki erityisen haasteellista se, ettei sitä kehitetty Konstruktio-tekniikan laboratorion yhteydessä ja käyttöympäristössä tapahtuva testaus vaati ulkopuolista työpanosta. Näin testaaminen oikeassa ympäristössä rajoittui lähinnä integraatiotestaukseen. Ohjelmiston kehitykseen lähdettiin liian korkein tavoittein. Mikäli ohjelmistoon olisi alusta pitäen otettu mukaan Gaze Tracker olisi kokonaisuus ehditty toteuttaa huolellisemmin ja kameroiden testaus olisi voinut alkaa aikaisemmin. Huomattavaa on myös se, ettei tässä testauksessa saadut katseen osumakohdat edusta fiksaatioita. Katseen osumakohtien voidaan olettaa olevan katsepolulla, mutta fiksaatioiden tunnistamiseksi dataa pitäisi suodattaa.

Toteutettu järjestelmä osoitettiin toimivaksi käyttäjätestauksella. Käyttäjätestauksessa tarkasteltiin katseenseurannan tarkkuutta ja latenssia tehtävällä, jossa testikäyttäjä kohdisti katseensa eri virtuaaliympäristön objekteihin äänitteeltä kuuluneen noin minuutin mittaisen sekvenssin mukaisesti. Tallennetusta datasta visualisoiduista kuvista nähtiin katseen osumakohtien hajonta (sisäinen tarkkuus) ja kasojen sijainti sekvenssissä toistettujen objektien suhteen (ulkoinen tarkkuus). Lisäksi tarkasteltiin tulosten muuttumista vertailemalla dataa tehtävän alusta ja lopusta, arvioitiin järjestelmän latenssia ja kerättiin palautetta järjestelmän käyttömukavuudesta sekä testikäyttäjiltä että testihenkilökunnalta.

Käyttäjätestaus suunniteltiin tarpeettoman monimutkaiseksi. Koska latenssi ei riippunut käyttäjästä, sen arvioiminen olisi voitu jättää kokonaan pois. Äänitetty sekvenssi olisi myös voitu suunnitella paljon hitaammaksi. Sekvenssi suunniteltiin nopeatempoiseksi katseen harhailun vähentämiseksi, mutta se olisi voinut olla merkittävästi hitaampi. Liian nopean sekvenssin voidaan olettaa aiheuttaneen osumien hajontaa, koska testikäyttäjällä ei välttämättä ollut aikaa kohdistaa katsettaan huolellisesti. Paljon hitaamman sekvenssin käyttö tuottaisi laadukkaampaa dataa järjestelmän tarkkuudesta.

Kaiken kaikkiaan käyttäjätestaus onnistui tiukka aikataulu huomioiden hyvin. Järjestelmä osoittautui toimivaksi ja siitä tunnistettiin merkittävimmät jatkokehitystarpeet, jotka esitellään myöhemmin tässä luvussa. Kalibrointiongelmat ja yhden käyttäjän kalibroinnin epäonnistuminen ei ollut poikkeuksellista [84]. Käyttäjätestauksen datasta visualisoiduista kuvista näkyi, että katseenseurannan tarkkuus oli järjestelmän korjattavissa olevat puutteet huomioiden hyvä. Katseen osumien kasat osuivat pääsääntöisesti kohteeseen ja hajontaa oli suhteellisen vähän.

Järjestelmän latenssin arvioitiin olevan alle 0,1 sekuntia, joka on riittävä valtaosaan sovelluksista. Latenssin ei osattu odottaa olevan näin pieni ja testijärjestely suunniteltiin alun perin latenssin hyvin karkeaan arvioon. Integraatiotestauksen ja pilottitestauksen perusteella testijärjestelyä paranneltiin ja sekuntikelloa referenssinä käyttäen latenssin voitiin todeta olevan alle 0,1 sekuntia. Järjestelmälle mahdollisesti ilmaantuvat käyttötarkoitukset määrittävät myöhemmin miten lyhyt latenssin täytyy olla ja kuinka paljon latenssis-

sa saa olla vaihtelua. Esittelykäytössä järjestelmän silmämääräisesti lähes reaaliaikainen vaste on riittävä ja edustava, eikä tässä vaiheessa kehitystyötä ollut tarpeellista selvittää latenssia tämän tarkemmin.

Toimintavarmuutta häyttasi erityisesti kalibroinnin hankaluus. Osalla testikäyttäjistä kalibointi onnistui hyvin, mutta osalla ei. Kaikilla käyttäjillä silmä jäi katseenseuranta-kameran kuvan alarajalle, joka saattoi häiritä kalibointia. Myös manuaalisen työn määrä ohjelmia käynnistettäessä jokaisen testin alussa heikensi toimintavarmuutta. Jatkokehityksen osalta on merkittävää, että ohjelmistoa siistitään ja sen käyttöä yksinkertaistetaan. Ohjelmat olisi syytä paketoita yhdeksi kokonaisuudeksi. Yksi vaihtoehto olisi rakentaa 3D-katseenseuranta osaksi esimerkiksi Gaze Trackeria, sillä Gaze Tracker on avointa lähdekoodia.

Kalibroinnin aikana pään pitäminen paikallaan ei osoittautunut kovin hankalaksi. Tämän asian varmistaminen vaatisi mittauksia. Mikäli pään liikkuminen kalibroinnin aikana ei merkittävästi heikennä katseenseurannan tarkkuutta, ei ohjelmistoa ole näiltä osin tarpeen muuttaa [59] vastaavaksi. Selvää syytä kaikkiin kalibrintiongelmiin ei löydetty. Järjestelmässä saattaa olla laskentavirhe jonka etsimiseksi voi olla tarpeen suunnitella erityisiä testejä. Kyseessä voi hyvinkin mahdollisesti olla vain yksittäinen väärä arvo.

Pään paikannus myös tuotti usealla testihenkilöllä virhetilanteen, jossa katseenseurannan osuma tippui lähelle testikäyttäjän jalkoja, vaikka hän katsoi suoraan eteenpäin. Jatkotestauksen kannalta olisi mielekästä kehittää virheiden tunnistus ja häiriöiden suodatus. Nykyisessä järjestelmässä virhetilanteiden tunnistaminen oli mahdollista kohtuullisella vaivalla lähinnä testauksen aikana näytöltä seuraamalla. Myös kohinan lähteiden tunnistaminen olisi oleellista katseenseurannan tarkkuuden parantamiseksi.

Datan suodatus on tärkeää niiden häiriöiden poiston kannalta, joiden lähdettä ei pystytä eliminoimaan. Datan suodatuksen voidaan olettaa parantavan sisäistä tarkkuutta jopa merkittävästi, sillä järjestelmässä oli ilmeisesti pään paikannuksesta syntynyttä häiriötä suhteellisen paljon. Dataa suodattamalla voitaisiin myös tunnistaa sakkadit ja fiksaatiot. Sakkadien ja fiksaatioiden tunnistaminen auttaisi myös datan visualisoinnin parantamisessa.

Laitteisto on pieniä parannuksia vaille käyttövalmis. Laitteiston osalta korjattava on kameran asemointi ja valaistus. Kameran asennukseen käytettävästä rungosta voisi myös tehdä säädettävän niin, että kameraa voisi tarvittaessa kääntää käyttäjän silmän sovittamiseksi videokuvaan. Infrapunaedit kuumenivat paljon ja ovat liian lähellä käyttäjän kasvoja. Kuumat ledit luovat epämiellyttävän tunteen. Ledien sijoittaminen 3D-lasien linssin ulkopuolelle saattaa olla mahdollista, sillä linssi läpäisee hyvin infrapunataajuutta. Jos ledit asennetaan linssin ulkopuolelle, ne voivat myös olla fyysisesti isompia. Tämä parantaa valikoimaa, eikä ledejä mahdollisesti tarvita kuin yksi. Ledin asemoinnissa on kuitenkin huomattava, ettei ledit ja kameran kuvakulma saa olla lähellä samaa akselia tai muuten infrapuna heijastuu verkkokalvolta ja pupilli näkyy videokuvassa valkoisena.

Konstruktiivinen lähestymistapa soveltui hyvin tämän työn menetelmäksi. Työssä luotu konstruktio käsitti geneerisen laitteiston ja ohjelmiston, joita voidaan kehittää myöhemmin tarkentuvien vaatimusten perusteella. Konstruktion toimivuus osoitettiin käyttäjätestauksella. Käyttäjäkeskeinen suunnittelu ei ollut tämän työn lähtökohtana. Tavoitteena ei ollut prototyypin tässä kehitysvaiheessa tunnistaa varsinaisia loppukäyttäjiä tai heidän tehtäviään järjestelmän kanssa, vaan kehittää esittelykelpoinen prototyyppi. Mikäli järjestelmän käyttäjät ja käyttötapaukset olisi selvitetty, käyttäjäkeskeisten menetelmien käyttö olisi ollut hyvinkin suotavaa. Tällaisessa tapauksessa myös testaus olisi ollut mielekäs toteuttaa laajempaan osoittaen eri käyttäjäryhmien tarpeiden ja käyttötapauksien erityispiirteiden tullun huomioiduksi riittävällä tasolla.

Tässä työssä toteutettu järjestelmä on kohtuullisella jatkokehityksellä sovellettavissa moneen eri tarkoitukseen, kuten käytettävyydestä testaukseen tai virtuaaliympäristöjen visualisoinnin parantamiseen. Vaikka katseenseuranta virtuaaliympäristössä voitaisiin käyttää hyödyksi monella tavalla, merkittävin käyttö tällä hetkellä lienee kuitenkin virtuaaliympäristöjen tekeminen houkutteleviksi esittelemällä uutta tekniikka ja uusia mahdollisuuksia. Kuten Nilsen Norman Groupin raportissa [67] todetaan, "Eyetracking is showbiz."

LÄHTEET

- [1] Cruz-Neira, C., Sandin, D. J., DeFanti, T. A., Kenyon, R. V. & Hart, J. C. The CAVE: Audio Visual Experience Automatic Virtual Environment. *Communications of the ACM* 35(1992)6. pp. 64-72.
- [2] Kasanen, E., Lukka, K. & Siitonen, A. The constructive approach in management accounting. *Journal of Management Accounting Research* 5(1993). pp. 243-264.
- [3] ISO 13407:1999. Human Centred Design Process for Interactive Systems. Geneva 1999, International Organization for Standardization. 32 p.
- [4] Lehtinen, M. Katseenseuranta. Ovaska, S., Aula, A. & Majaranta, P. (toim.) Käytettävyydestutkimuksen menetelmät. Tampereen yliopisto, Tietojenkäsittelytieteiden laitoksen raportti B-2005-1, 2005. pp. 223-236.
- [5] ISO 9241-11. Näyttöpäätteillä tehtävän toimistotyön ergonomiset vaatimukset. Osa 11: Käytettävyyden määrittely ja arviointi. Helsinki 1998, Suomen Standardisoimisliitto. 44 s.
- [6] Itäsalo, A-V. Diplomityö. Tampere 2009. Tampereen teknillinen yliopisto. 75 p. Viitattu 22.10.2011, <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tyy-201007081265> .
- [7] Tietotekniikan liiton sanastotoimikunta. Tietotekniikan liiton ATK-sanakirja. Helsinki 1999, Suomen ATK-kustannus Oy. 489 p.
- [8] Taylor II, R. M., Hudson, T.C., Seeger, A., Weber, H., Juliano, J. & Helser, A. T. VRPN: A Device-Independent, Network-Transparent VR Peripheral System. *ACM Symposium on Virtual Reality Software & Technology* 2001. Banff, Canada, November 15 - 17, 2001. ACM 2001. pp. 55-61.
- [9] Sherman, W. R. & Craig, A. B. *Understanding Virtual Reality-Interface, Application, and Design*. Volume 2. USA 2003, Morgan Kaufmann. 582 p.
- [10] Zeltzer, D. Autonomy, interaction and presence. *Presence* 1(1992)1, pp. 127-132.
- [11] Kalawsky, R. Critical aspects of visually coupled systems. In: Earnshaw, R., Gigante, M. & Jones, H. (eds.), *Virtual Reality Systems*. London 1993, Academic Press. pp. 302-312.
- [12] Reitmaa, I., Vanhala, J., Kauttu, A. & Antila, M. *Virtuaaliympäristöt -kuvan sisälle vievät tekniikat*. Helsinki 1995, TEKES. 171 p.
- [13] *The Matrix*, Directed by Wachowski, A. & Wachowski, L. 1999, Warner Brothers.

- [14] Schubert, T. W., Friedmann, F., & Regenbrecht, H. T. The experience of presence: factor analytic insights. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 10(2001)3, 266–281.
- [15] Slater, M. A note on presence terminology. *Presence connect* 3(2003)3.
- [16] Witmer, B. G. & Singer, M. J. Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 7(1998)3, 225–240.
- [17] Milgram, P., Takemura, H., Utsumi, A. & Kishino, F., *Augmented Reality: A Class of Displays on the Reality-Virtuality Continuum*. Proceedings of Telemanipulator and Telepresence Technologies. Boston, Massachusetts, USA, 31 October-1 November, 1994. SPIE Press, 1994. pp. 282-292.
- [18] Pocket lint, What is Augmented Reality? Viitattu 1.11.2011, <http://www.pocket-lint.com/news/38795/what-is-augmented-reality-ar>
- [19] Telepresence TV, New York Times, Viitattu 1.11.2011, <http://www.nytimes.com/2007/05/29/technology/29video.html>
- [20] Satava, R. M. & Jones, S. B. Preparing surgeons for the 21st century: implications of advanced technologies. *Surgical Clinics of North America* 80(2000)4, pp. 1353-1365
- [21] Avatar. Directed by Cameron, J. 2009, Twentieth Century Fox.
- [22] In pictures: Robot tackles 'suicide bomber', BBC News, Viitattu 1.11.2011, http://news.bbc.co.uk/2/hi/middle_east/1976341.stm
- [23] Law, A. & Kelton, W. D. *Simulation Modelling and Analysis*. New York 1991, McGraw-Hill. 383 p.
- [24] Paul A. Fishwick. *Computer simulation: The art and science of digital world construction*. IEEE Potentials, February-March 1996. pp. 24-27.
- [25] Pratt, M. J. Virtual prototypes and product models in mechanical engineering. In *Virtual Prototyping – Virtual environments and the product design process*, Joachim Rix, Stefan Haas & José Teixeira (Eds.) Chapman & Hall, 1995. pp. 113–128.
- [26] D. G. Ullman. *The Mechanical Design Process*. McGraw-Hill, 1992.
- [27] Ulrich, K. & Eppinger, S. *Product Design and Development*. 3rd. Ed. McGraw-Hill, Boston 2003.

- [28] Sensorama by Morton Heilig, Viitattu 2.11.2011,
<http://www.telepresence.org/sensorama/index.html>
- [29] Kuvat lentosimulatoreista, Viitattu 2.11.2011,
<http://www.boeing.com>
- [30] 5DT HMD 800 sarjan silmikkonäyttö, Viitattu 2.11.2011,
<http://www.vrealities.com/5dt.html>
- [31] Mercedes-Benzin CAVE, Viitattu 2.11.2011,
<http://www.emercedesbenz.com/Apr06/18DesignOfThe2007MercedesSClass.html>
- [32] Just, M. A., & Carpenter, P. A. Eye fixations and cognitive processes. *Cognitive Psychology* 8(1976), pp. 441-480.
- [33] Jacob, R. J. K. The use of eye movements in human-computer interaction techniques: what you look at is what you get. *ACM Transactions on Information Systems* 9(1991)2, pp. 152-169.
- [34] Jacob, R. J. K. Eye tracking in advanced interface design. In: Barfield, W. & Furness, T. A. (Ed.), *Virtual environments and advanced interface design*. New York, USA 1995, Oxford University Press, Inc. pp. 258-288.
- [35] Marjaranta, P. & Räihä, K-J. Twenty years of eye typing: systems and design issues. *ETRA '02 Proceedings of the 2002 symposium on Eye tracking research & applications*. New Orleans, Louisiana. March 25-27, 2002. ACM Press. pp. 15-22.
- [36] Irwin, D. E. Visual Memory Within and Across Fixations. In: Rayner, K. (Ed.), *Eye movements and visual cognition: Scene perception and reading*. New York, USA 1992, Springer-Verlag. pp. 146-165.
- [37] Yarbus, A. L. *Eye Movements and Vision*. New York, Plenum Press, 1967. 222 p.
- [38] Duchowski, A. T. *Eye tracking methodology: theory and practice*. London 2007, Springer. 328 p.
- [39] Katseenseurannan periaatekuva, Viitattu 2.11.2011,
<http://www.uarts-eyetracking.org/>
- [40] SMI katseenseurantalasit, Viitattu 17.10.2011,
<http://www.eyetracking-glasses.com/>
- [41] Tobii TX300 Eye Tracker, Viitattu 2.11.2011,
<http://www.tobii.com/eye-tracking-integration/global/products-services/hardware/tobii-tx300-eye-tracker/>

- [42] Agustin, J. S., Skovsgaard, H., Hansen, J. P. & Hansen D. W. Low-cost gaze interaction: ready to deliver the promises. CHI EA '09 Proceedings of the 27th international conference extended abstracts on Human factors in computing systems. Boston, USA, April 4-9, 2009. New York, USA, 2009, ACM. pp. 4453-4458.
- [43] Johansen, S. A., Augustin, J. S., Skovsgaard, H. & Tall, M. Low cost vs. high-end eye tracking for usability testing. CHI EA '11 Proceedings of the 2011 annual conference extended abstracts on Human factors in computing systems. Vancouver, Canada, May 7-12, 2011. New York, USA, 2011, ACM. pp. 1177-1128.
- [44] Badcock, J. S. & Pelz, J. B. Building a lightweight eyetracking headgear. ETRA '04 Proceedings of the 2004 symposium on Eye tracking research & applications. San Antonio, Texas, USA, March 22-24, 2004. New York, NY, USA, 2004, ACM. pp. 109-114.
- [45] Kowalik, M. How to build low cost eye tracking glasses for head mounted system. Viitattu 17.10.2011,
<http://www.mkowalik.pl/et/How%20to%20build%20low%20cost%20eyetracking%20glasses.pdf>
- [46] Gaze Tracker ohjelmiston verkkosivu, Viitattu 18.10.2011,
<http://www.gazegroup.org/downloads/23-gazetracker>
- [47] EyeWriter verkkosivu, Viitatu 7.12.2011,
<http://www.eyewriter.org/>
- [48] Kocejko, T., Bujnowski, A. & Wtorek, J. Eye mouse for disabled. Conference on Human System Interaction. Krakow, Poland, 25-27 May, 2008. pp. 199-202.
- [49] Fono, D. & Roel Vertegaal, R. EyeWindows: Evaluation of Eye-Controlled Zooming Windows for Focus Selection. CHI'05 Conference on Human Factors in Computing Systems. Portland, Oregon, USA, April 2-7, 2005. New York, NY, USA, 2005, ACM. pp. 151-160.
- [50] Jacob, R. J. K. Eye Movement-Based Human-Computer Interaction Techniques: Toward Non-Command Interfaces. Advances in human-computer interaction. Ablex Publishing, 1993. pp. 151-190.
- [51] Law, B., Atkins, M. S., Kirkpatrick, A. E. & Lomax, A. J. Eye gaze patterns differentiate novice and experts in a virtual laparoscopic surgery training environment. ETRA '04 Proceedings of the 2004 symposium on Eye tracking research & applications. San Antonio, Texas, USA, March 22-24, 2004. New York, NY, USA, 2004, ACM. pp. 42-48.

- [52] Underwood, G., Humphrey, K. & Foulsham, T. Knowledge-Based Patterns of Remembering: Eye Movement Scanpaths Reflect Domain Experience. USAB '08 Proceedings of the 4th Symposium of the Workgroup Human-Computer Interaction and Usability Engineering of the Austrian Computer Society on HCI and Usability for Education and Work. Graz, Austria, November 20-21, 2008. Heidelberg, 2008, Springer-Verlag. pp. 125-144.
- [53] Fitts, P. M., Jones, R. E., & Milton, J. L. Eye movements of aircraft pilots during instrument-landing approaches. *Aeronautical Engineering Review* 9(1950)2. pp. 24–29.
- [54] Jacob, R. J. K., & Karn, K. S. Eye Tracking in Human-Computer Interaction and Usability Research: Ready to Deliver the Promises. In Hyöynä, J. Radach, R & Deubel, H. (Eds.), *The Mind's Eye: Cognitive and Applied Aspects of Eye Movement Research*. Amsterdam, The Netherlands, 2003, Elsevier Science. pp. 573–605.
- [55] Poole, A. & Ball, L. J. Eye Tracking in Human-Computer Interaction and Usability Research: Current Status and Future Prospects. In: Ghaoui, C. (Ed.), *Encyclopedia of Human-Computer Interaction*. Pennsylvania 2005, Idea Group Inc. pp. 211-219.
- [56] Ehmke, W & Wilson, S. Identifying Web Usability Problems from Eye-Tracking Data. BCS-HCI '07 Proceedings of the 21st British HCI Group Annual Conference on People and Computers: HCI...but not as we know it - Volume 1. Lancaster, UK, 3-7 September, 2007. Swinton, UK, 2007, British Computer Society. pp. 119-128.
- [57] Albanesi, M. G., Gatti, R., Porta, M. & Ravaelli, A. Towards Semi-Automatic Usability Analysis through Eye Tracking. *CompSysTech'11 Proceedings of the 12th International Conference on Computer Systems and Technologies*. Vienna, Austria, June 16 - 17, 2011. New York, NY, USA, 2011, ACM. pp. 135-141.
- [58] Pelz, J. B., Canosa, R. L., Kucharczyk, D., Babcock, J., Silver, A. & Konno, D. Portable Eyetracking: A Study of Natural Eye Movements. *Proceedings of SPIE*. 2000, SPIE Press. pp. 566-582.
- [59] Pfeiffer, T. Towards Gaze Interaction in Immersive Virtual Reality : Evaluation of a Monocular Eye Tracking Set-Up. *Virtuelle und Erweiterte Realität Fünfter Workshop der GIG Fachgruppe VR/AR*. Magdeburg, Germany. September 25-26, 2008. Shaker Verlag. pp. 81-92.
- [60] D. Luebke, B. Hallen, D. Newfield, & B. Watson. 2000. Perceptually Driven Simplification Using Gaze-Directed Rendering. University of Virginia, University of Virginia Technical Report. 9 p.

- [61] S. Hillaire, A. Lecuyer, R. Cozot, & G. Casiez. Using an Eye-Tracking System to Improve Camera Motions and Depth-of-Field Blur Effects in Virtual Environments. IEEE Virtual Reality. Reno, Nevada, USA. March 8-12, 2008. pp. 47–50.
- [62] Garau, M., Slater, M., Vinayagamoorthy, v., Brogni, A., Steed, A. & Sasse, M. A. The Impact of Avatar Realism and Eye Gaze Control on Perceived Quality of Communication in a Shared Immersive Virtual Environment. CHI '03 Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems. Ft. Lauderdale, Florida, USA, 2003. New York, NY, USA, 2003, ACM. pp. 529-536.
- [63] A. T. Duchowski, E. Medlin, N. Cournia, A. Gramopadhye, B. Melloy, & S. Nair. 3D Eye Movement Analysis for VR visual inspection training. ETRA'02 Proceedings of the Symposium on Eye tracking Research & Applications. New Orleans, Louisiana. March 25-27, 2002. ACM Press. pp. 103-110.
- [64] J. Barabas, R. B. Goldstein, H. Apfelbaum, R. L. Woods, R. G. Giorgi, & E. Peli. Tracking the line of primary gaze in a walking simulator: modeling and calibration. Behavior Research Methods, Instruments, & Computers, 36(2004)4. pp. 757-770.
- [65] Haffegge, A., Alexandrov, V. & Barrow, R. Eye tracking and gaze vector calculation within immersive virtual environments. VRST '07 Proceedings of the 2007 ACM symposium on Virtual reality software and technology. Newport Beach, California, November 5–7, 2007. ACM Press. pp. 225-226.
- [66] Rubin, J. Handbook of Usability Testing: How to Plan, Design, and Conduct Effective Tests. Indianapolis USA 2008, Wiley Publishing, Inc. 386 p.
- [67] Pernice, K. & Nilsen, J. Eyetracking Methodology, How to Conduct and Evaluate Usability Studies Using Eyetracking. Nilsen Norman Group 2009. 164 p.
- [68] Optitrack, Viitattu 25.09.2011,
<http://www.naturalpoint.com/optitrack/>
- [69] Misumi Electronics Corp., Viitattu 28.09.2011,
<http://www.misumi.com.tw/>
- [70] Campro Technology Co., Ltd., Viitattu 29.09.2011,
<http://www.campro-cctv.com/index.php>
- [71] Medigus micro cameras, Viitattu 28.09.2011,
<http://www.medigus.com/MicroCamerasOverview/Cameras.aspx>
- [72] Terratec G1 USB-videokaappari, Viitattu 02.10.2011,
http://www.terratec.net/en/products/technical-data/produkte_technische_daten_en_105091.html

- [73] Black Magic Intensity Pro videokortti, Viitattu 02.10.2011,
<http://www.blackmagic-design.com/products/intensity/>
- [74] Ellion HMR-600H mediatalennin, Viitattu 02.10.2011,
http://www.elliondigital.com/eng/600H_01.htm
- [75] EasyCap USB-videokaappari Deal Extreme verkkokaupassa, Viitattu 02.10.2011,
<http://www.dealextreme.com/p/easycap-usb-video-capture-adapter-5707>
- [76] Osram SFH4050-Z infrapunaledin spesifikaatio, Viitattu 02.10.2011,
<http://www.farnell.com/datasheets/86279.pdf>
- [77] Osramin SFH4252 infrapunaledin spesifikaatio, Viitattu 02.10.2011,
<http://www.farnell.com/datasheets/43566.pdf>
- [78] Optekin OP280 infrapunaledin spesifikaatio, Viitattu 02.10.2011,
<http://www.farnell.com/datasheets/86970.pdf>
- [79] Li, D., Babcock, J. & Parkhurst, D. J. openEyes: a low-cost head-mounted eye-tracking solution. ETRA'06 Proceedings of the 2006 symposium on Eye tracking research & applications. San Diego, California, USA, March 27-29, 2006. New York, NY, USA, 2006, ACM. pp. 95-100.
- [80] openEyes verkkosivu, Viitattu 03.10.2011,
<http://thirtysixthspan.com/openEyes/software.html>
- [81] Opengazer katseenseurantaohjelma webbikameralle, Viitattu 06.10.2011,
<http://www.inference.phy.cam.ac.uk/opengazer/>
- [82] TrackEye katseenseurantaohjelma webbikameralle, Viitattu 06.10.2011,
<http://www.codeproject.com/KB/cpp/TrackEye.aspx>
- [83] Mallinnettu talo kuvan taustalla, CADD Training, Viitattu 20.10.2011,
<http://www.gbccadd.com/>
- [84] Goldberg, J. H. & Wichansky, A. M. Eye tracking in usability evaluation: A practitioner's guide. In Hyönä, J., Radach, R. & Deubel, H. (Eds.) The Mind's Eye: Cognitive and Applied Aspects of Eye Movement Research. Amsterdam, Netherlands, 2003, Elsevier Science. pp. 493–516.